

### 巻頭言

#### 1 科学者と専門家の役割

吉川弘之

### 時論

#### 2 脱原発と格闘するドイツ

ドイツ国民の熱望した「脱原発」。しかし今、その興奮が急速にトーンダウンしている。一番の原因は膨大な経費。「脱原発」の難しさを探る。  
川口マーン恵美

#### 4 太平洋のレアアース泥鉱床の発見と開発可能性

レアアースを豊富に含んだ泥が、太平洋の深海底に大量に分布していることがわかった。  
加藤泰浩

### 特集 放射線防護に用いられる線量概念

#### 13 線量概念の概要と防護量

物理量に基礎を置きながら ICRP/ICRU によって構築されてきた線量概念である防護量と実用量を含む放射線防護線量体系全体を説明し、その中で放射線健康リスクと関連のある線量概念である防護量(実効線量など)の成立の経緯について解説する。

#### 17 実用量と防護量

外部被ばくの状態を考えて、放射線量の測定器の指示値と関連を持つ周辺線量当量および個人線量当量という2つの実用量の定義、ならびに実用量と防護量の関係について解説し、福島第一発電所事故対策で使用されている線量概念についても言及する。

#### 21 福島等で使用されている線量計と防護量の関係

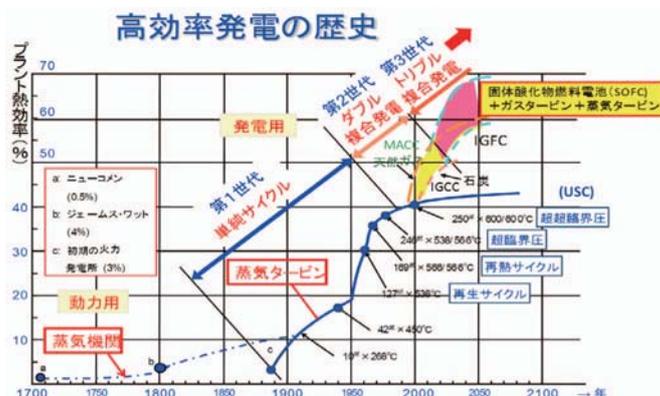
地表・地中に広く分布した線源による放射線場の特徴と、その放射線場の線量を測定するための線量計(サイベイメータ等)の値および個人の被ばく線量を測定するための個人被ばく線量計の値と防護量との関係について解説する。

放射線工学部会 線量概念検討ワーキンググループ

### 解説

#### 27 最近の世界のエネルギー確保の動き・経済ダイナミズムと関連技術—日本のエネルギーの今後と産業復興

3.11後を経て、日本のエネルギーのあり方が大きく変わろうとしている。環境・経済・安全が確保できる共存解はあるのか。どうすれば持続可能な経済成長が実現するのかを考察する。  
金子祥三



#### 32 ICRP 2007年勧告への道のり—放射線による健康障害の低減を目指して

国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告は、各国の放射線、RI 防護管理規制に取り込まれてきた。ここでは「合理的に達成可能な限り低く(ALARA)」原則を重視する2007年勧告にいたる歴史と防護基準の変遷を解説する。

佐々木康人, 岡崎 篤

#### 36 現存被ばく状況における参考レベルの適用

—汚染の状況に応じた段階的な線量低減に向けて

福島原子力発電所事故後、平時とは異なる防護基準や食品の基準値が定められた。これは一時的に許容される「参考レベル」と呼ばれ、ICRP の考え方にもとづくものである。事故後に講じられた例をもとに、段階的な参考レベルの適用について考察する。

荻野晴之, 浜田信行, 杉山大輔

表紙の絵(洋画) 「雪舞い」 制作者 武田敏雄

【制作者より】 日本海より最上川を逆白波を立て舞い上がる雪に、あたり一面、白い神々の座となる。また、晴れゆくときも美しい。

第43回「日展」へ出展された作品を掲載(表紙装丁は鈴木 新氏)

## 解説

### 41 プルトニウムのトリレンマにいかに対処するか—原子力政策転換に伴うプルトニウム核不拡散への対応

前民主党政権は原発稼働ゼロをめざす一方で、再処理事業にも取り組む方針を示した。これは「利用目的のないプルトニウムを持たない」というこれまでの核不拡散政策と整合がとれない。今後の選択肢にはどのようなものがあるだろうか。 久野祐輔ほか

## 報告

### 47 ICRP の最新動向と福島事故対応—第27回原安協シンポジウムより

ICRP に蓄積されている知識と経験は福島事故からの復旧・復興に役立つものと考えられる。一方、福島事故は ICRP が提唱してきた放射線防護の考え方の妥当性が検証される機会でもある。 酒井一夫

## 連載講座 これからの原子力システムを担う新原子力材料(第6回)

### 53 機能材料(増殖・増倍材料を含む)

計測機能材料やトリチウム増殖材料、中性子増倍材料など、核融合システムにとって重要な広義の機能性材料について解説する。

中道 勝, 星野 毅, 四電樹男



JMTR 炉心に挿入した熔融シリカ光ファイバ中を通過した白色光の出口出力の着色

## 報告

### 50 組織や専門分野を超えた若手交流の意義—原子力若手討論会報告

YGN は昨年 6 月に「原子力若手討論会」を開催し、現在の原子力を取り巻く問題や将来像について議論した。

永田章人, 後藤弘行



## 6 NEWS

- 安倍新政権が発足
- 規制委員会、大飯と東通の破碎帯を調査
- 「原子力安全推進協会」が発足
- 規制委、緊急被ばく医療検討開始
- 規制委、有識者から意見を聴取
- 福島県が核燃料税を廃止
- 東電、J ヴィレッジに「福島復興本社」
- 海外ニュース



原子力学会の福島原発事故調査委員会は昨年12月と今年1月に、東京電力の福島第一原子力発電所を視察しました。上の写真は、使用済み核燃料プールがある4号機の建屋屋上から、隣の3号機を見ているところです。

(東京電力提供)

## 会議報告

### 58 「2012年秋の大会」倫理委員会セッション報告

柴田洋二

20 From Editors

46 新刊紹介

「地層処分—脱原発後に残される科学課題—」

稲垣八穂広

59 会報 原子力関係会議案内、共催行事、人事公募、英文論文誌審査・投稿システム移行お知らせ、次年度会費請求お知らせ、「2013年春の年会」見学会案内、英文論文誌 (Vol.50, No. 2) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧

学会誌ホームページはこちら

<http://www.aesj.or.jp/atomos/>

# 科学者と専門家の役割



科学技術振興機構 研究開発戦略センター長

**吉川 弘之**(よしかわ・ひろゆき)

東京大学教授，同総長，産業技術総合研究所理事長などを経て，現職。一般設計学，構成の一般理論を研究。「本格研究」，「科学者の新しい役割」，「テクノロジーと教育のゆくえ」などの著書あり。

福島原子力発電所の事故を経験して，これからの原子力政策を国民全体の意志で改めて決めなければならないというこの時に，原子力関連の科学者，専門家の見解が聞こえてこない。残念なことに原子力村というような，内容を明示しない表現によって科学者，専門家に責任を負わせ，その発言を封じる風潮があるとすら言われる。言うまでもなく，将来の方向を決めるためにいま最も必要なのは専門的知識を持つ者の助言であるのに，それを封じるのはこれからの政策決定の質を極度に悪くする。

科学者と専門家の役割は異なるが，ここでは科学的知識の社会的適用という点で共通であるとして考えよう。科学者による研究成果が現実的課題に使用される時，その中心にいるのが専門家である。研究が理学や工学なら技術者が，医学なら医師が専門家であり，彼らは臨床研究を通じて，科学研究における行動規範，倫理規定を科学研究者と同様に知っているだけでなく，科学的知識使用における規範や規定も学んでいる。その意味で，規範のもとに，持続性，安全，健康影響などについての科学的判断をしつつ研究する科学者と，同じく使用する専門家とは，助言の能力を持ち，また助言する責任を負う。

一方多様な技術が科学に依拠する現代において，多くの政策決定に科学的知識が不可欠となった。しかも科学的知識の急増する今，依拠すべき知識は現在生み出されつつある科学的知識が対象となり，したがって科学者と専門家とが，社会における政策決定に関与する必要が大きくなってきたのである。

科学者・専門家の助言は，もはやあればよいものでなく，なければ社会の成立を危うくするほどのものであることが我々の実感である。水俣病，薬害，アスベスト，遺伝子組み換え食品，狂牛病，干拓，ダム，など，最終的には科学的判断によって問題が収束するとはいえ，判断の過程での科学者の助言の不十分さによって，被害者への負担を大きくしてしまったわが国の歴史がある。諸国で急速に進められている，科学者の政策決定への協力である助言を可能にする政策と組織が，わが国では決定的に遅れていることが，一つの重要な福島から学ぶべきことである。

政治あるいは行政の政策決定は，個人や民間企業の決定と違って決定の結果についての責任を，その仕組みを支持し認知している国民自身が結局は負わなければならないという事実から言って，その決定に対する科学的助言が恣意的であることはもちろん，自らの学説にこだわるものであることも許されない。できるだけ多くの科学者・専門家の主張を踏まえ専門的に十分な討議を経て，合意される部分と対立見解のあるところを明示した形で助言が作られる。これは科学者・専門家が助言者の行動規範の中におかれることを意味する。一方助言を受ける政策決定者は，自らの責任において決定をする。助言と矛盾する決定もあり得るが，その時はその理由を公開することが義務付けられる。これは政策決定者側の行動規範である。

ある課題に関係する政策の決定に際し，その分野の科学者・専門家を利害関係者だとして排除する風潮は断固としてやめなければならない。そのための条件として政策決定者側の科学者・専門家に対する信頼が必要だが，そのためには助言する科学者・専門家が，社会的利害から中立で，自分の学説に対立する者に耳を傾けるゆとりを持ち，かつ科学が社会に及ぼす効果について深く考える，独立な思索者であることが求められる。

(2012年12月11日 記)



## 脱原発と格闘するドイツ



### 川口マーン恵美

(かわぐち・まーん・えみ)

作家・拓殖大学日本文化研究所 客員教授  
独シュトゥットガルト国立音楽大学大学院  
修了。『フセイン独裁下のイラクで暮らして』、『サービスできないドイツ人、主張できない日本人』などの著書あり。「現代ビジネス (<http://gendaiismedia.jp/>)」にて『シュトゥットガルト通信』連載中(毎週金曜日更新)。

2011年6月30日、ドイツで脱原発が決定したときのシーンは、23年前、ベルリンの壁が落ちたときのそれとよく似ていた。与党も野党もなくなり、国民の誰もが心一つにして、祖国ドイツに誇りを感じていた。ようやく長い闘争に終止符が打たれたのだ！それぞれの心に悲喜こもごもが蘇る。皆が幸せで、得意で、実にすがすがしい表情をしていた。

ドイツ人というのは、倫理的に正しいことをしたいという欲求の強い人たちだ。彼らにとって脱原発は、まさに倫理的に正しいことだった。それを再生可能エネルギーで代替すれば、より正しい。そのためになら、自分たちが世界で孤立しても構わない、どんな困難が降りかかるだろうが、自分たちは正しいことをやり遂げるのだと、その意気込みと確信がドイツ国民を恍惚とさせていた。

しかしそれも無理はない。振り返ってみれば、ドイツ人の反原発運動の歴史は長かった。その機運が急激に高まったのは、1986年のチェルノブイリの事故のあとだ。風に乗って飛んできた放射性物質は南ドイツのバイエルン州の牧草地に降り、その草を食んだ牛の乳が汚染された。ドイツ中の母親たちはパニックに陥り、原発の恐怖を肝に銘じた。以来25年間、彼らはこの事件を決して忘れることがなかった。反原発は国民運動として定着し、人々は事あるごとにデモをし続けた。

そんな土壌があったのだから、脱原発の決定に皆が感動したのはいくらも。しかも、脱原発は莫大なお金がかかるということを、当時、政府ははっきりとは言わなかった。再生可能エネルギーを推進していけば急激に電気代が上がるだろうことも、バックアップのための発電所が必要なことも、あるいは、ドイツの北から南へ高圧送電線を何本も建設しなければいけないことも、政府は当時、ほとんど何も言わなかった。

その一方で、「きっとできる」というバラ色構想ばかりが大手を振っていた。懸念を表明する人々は、電力ロビーに与する勢力として切り捨てられた。人々にとって、「世

界に冠たる環境国、ドイツ」の魅力は大きかった。再生可能エネルギー技術への投資は、未来産業の先取りである。それは、ガス生産国への依存からの脱却と、確実に恒久的なエネルギーの供給を意味した。国民はあらゆる希望的観測を喜んで信じ、またたく間に、後ろ向きの意見は口に出せない雰囲気ができあがった。そう、あの頃のドイツ人はよく私に向かって、「大事故を起こしたにもかかわらず、なぜ、あなた方は脱原発に踏み切らないのか」と、非難がましく言ったものだ。

しかし、感動は長くは続かなかった。これも統一のときと同じだ。解放された検問所で手を取り合い、涙を流した東西の人々があっという間に陶酔からさめたように、脱原発を寿いだ人々も、今ではすっかり白けた顔をしている。冷静なドイツ人は、ときどき自画自賛で猪突猛進しては、そのあとストーンと正気に返るのだ。感動などまるで存在しなかったように。

ドイツ人が正気に返った理由は、やはり統一の時と同じく、国民に降りかかってくる経済的負担だ。12年10月、電気代に加算される翌年の助成金の額が発表された。それによると、1 kWhにつき3.59セントであった助成金が、13年には5.27セントになる。この値上げを受けて、11月20日、各電力会社が1月からの電気代の値上げを通告した。ドイツの電気代は扱う電力会社により大きな幅があるが、値上げの平均値は12パーセント、平均的な4人家族の家庭に当てはめると、125€ + 19%の消費税で、年間1万6,000円ほどの値上げとなるらしい(1€ = 110円で換算)。

電力会社の言い分では、値上げは助成金の値上げに即して行われるもので、便乗値上げはしていないらしいが、そのあたりは不透明。私たち消費者には、どのみち真実はわからない。ただ、電気を大量消費している大企業は、その負担を免除、あるいは、大幅に軽減されている。大企業の国際競争力がなくなると困るからというのが理由だが、助成金が一般家庭と中小企業だけの負担に

なっているという事実は、国民のあいだに不公平感を増長させている。

ドイツでは、2000年にできた再生エネルギー法に基づき、巨大なソーラーパークであろうが、畑の片隅に風車を一本だけ立てている農家であろうが、そこで発電された電気は、20年に亘って全量買取りが保障されている。買取り価格というのは、再生可能エネルギーを推進するためのものであるから、当然、市場価格よりも高い。そして、その差額は、電気代に乗せられている助成金で賄われる。つまり、買取り制度というのは、需要と供給に基づく市場原理とはまるで違った次元のところで、国民の負担で営まれているわけだ。

現在ドイツでは、全土で太陽が照る日の午後、太陽光電力の買取りのための額が跳ね上がり、それと裏腹に市場での電力価格は供給過剰で暴落する。そうでなくても大きい買取り価格と市場価格の差はさらに広がる。ただ、確かなのは、太陽光パネルはこれからまだまだ増えるということだ。買取り制度はおそらく破たんするだろう。

風力発電の供給過剰はさらに深刻だ。北ドイツではコンスタントに風が吹き、太陽光発電に比べて経済的効率も良い。太陽光発電が全助成金のほぼ半分を食いながら、全電力のわずか4%弱しか供給していないのに比べて、風力発電はその半分の助成金で7.6%を生産している(11年)。これは世界一の供給率だそうだ。

ただ、ネックは送電線の不備で、北ドイツの電気を中部、南部の工業地域に運ぶ手だてがない。だから、風の強い日は風車を止めるしか方法はなく、実際に11年は45日、12年はなんと68日も、発電が大幅に制限された。11年の風力の損失は120 GWhで、これは石炭の火力発電所10基分に相当するという。

送電線の建設が滞っている原因は、まずルートが決まらないこと。元々ドイツは各州の力が強く、州の境界線を越えた計画は利害の対立でなかなか決まらない傾向がある。しかも、このような大きなプロジェクトの場合、建設許可が出るまでに何年もかかる。それに加えて、住民の反対が高まっている。脱原発直後のアンケート結果では、80%の国民が「送電線が自分たちの町を通ること

もやむを得ない」と答えたが、計画が具体化してくれば話は別だ。40年間反原発を掲げてデモをした人々は、今、送電線建設反対のデモを始めた。

12月4日には、大量の電力を流せる耐熱送電線18キロが完成した。通常のケーブルは摂氏80度までしか耐えられず、大量の電気が流れて高温になると、だらりと垂れさがってしまうが、新しいそれは210度まで耐えられるため、一度に大量の電気を輸送することができるそうだ。いずれにしても、大規模な主要送電線(ドイツでは最近これを送電アウトバーンと呼んでいる)が緊急に必要で、現在、それが3本計画されている。

また、オフショア発電は、脱原発を成功させるための頼みの綱だが、その行く手も、技術的問題、環境問題、あるいは、技術的には可能でもコストが高すぎるなど、様々な問題に阻まれている。採算が取れないと投資する企業はなく、国にも財源はなく、助成金で開発すれば国民の電気代がさらに上がるため、プロジェクトはなかなか進まない。

今になってようやく、再生可能エネルギーによる大々的な電力供給は、ドイツ一国では不可能だということが言われ始めている。隣国から原発で作られた電力を輸入するのは可能だが、それはドイツ人のプライドが許さない。そこで、アフリカの砂漠から太陽光電気をヨーロッパまで引っ張ってくるなどという遠大な計画も取りざたされているが、どれも実現には100年くらいかかりそうだ。今、ドイツでは、バラ色構想は潮が引いたように去り、かつての原発への恐怖は、際限なき値上げに対する恐怖に変わりつつある。

ドイツ人の悲願「脱原発」は、チェルノブイリより25年の長い議論を経て叶ったものだ。それでも、その実現の困難さは、今、人々の想像を超えている。これを見ると、日本が福島事故からたった2年で何かを決めようとするのは無理があるような気がしてならない。専門家の意見を真摯に聞き、国民的な議論をもっと煮詰める必要があるのではないか。

(2012年12月10日 記)



## 太平洋のレアアース泥鉱床の発見と 開発可能性



加藤 泰浩(かとう・やすひろ)

東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター 教授  
東京大学大学院理学系研究科博士課程修了  
(理学博士)。東京大学大学院助教授、准教授などを経て現職。海洋研究開発機構(JAMSTEC)招聘上席研究員も兼任。2011年7月、『ネイチャー・ジオサイエンス』誌にて、太平洋の深海底にレアアース(希土類)を含む泥の大鉱床があることを発表して世界中で大反響を呼んだ。

2011年7月4日に、レアアースを豊富に含有した泥が太平洋の深海底に大量に分布していることを突き止めた我々の研究成果が国内外で広く報道され、世界に衝撃を与えた。英国のネイチャー・ジオサイエンス誌の電子版に掲載されたことを受けての世界同時の一斉報道であった。新規のレアアース資源が発見されたことが世界中で大きく報道された背景には、(1)レアアースが省エネ産業などの最先端産業だけでなく、軍事産業などの安全保障に関わる産業分野にとっても必須の材料であること、(2)こうした極めて重要な資源が中国一国によりほぼ独占的に産出されていること、の主に2つの事情が存在している。本稿では、レアアースを巡る最近の資源問題を解説し、新規資源であるレアアース泥の特長と、その開発可能性や資源戦略上の意義についても言及する。

レアアース(希土類元素)とは、元素周期律表第Ⅲ族に属する元素番号57のランタンから71のルテシウムまでのランタノイド15元素の総称である。同じ第Ⅲ族のスカンジウムとイットリウムを加えた17元素を指す場合もある。ランタンからユロピウムまでの7元素を軽レアアース、ガドリニウムからルテシウムまでの8元素を重レアアースと称するが、資源としての重要性は重レアアースの方が圧倒的に高い。レアアースは、素材原料として用いることで、極めて独特な磁気特性および光学特性を発揮する。ハイブリッドカーのモーター、ハードディスク、風力発電の発電機、LED電球、液晶テレビのバックライトなど、レアアースの最先端産業分野での用途は極めて多岐にわたっており、現代社会にはまさに欠かすことのできない資源といえる。

しかし、その97%が中国により産出されており、供給構造が極めていびつな資源である。2010年9月の尖閣諸島沖での漁船衝突事件をきっかけとして、中国はレアアースの輸出停止・制限を行い、日本だけでなく欧米をも巻き込んで世界中にレアアースショックを与えた。2011年に入ってからのレアアース価格は異常な高騰を続

け、8月の価格は1月と比べて3倍から10倍に達する高値を更新した。

中国は国内販売価格と輸出価格に差をつけることで、日本や海外企業の生産工場の国内誘致を強く推進しており、日本の最先端産業の生産技術流出が強く懸念されている。

中国がこうした強硬な姿勢に出ることができるのは、世界でも有数のレアアース鉱床を国内に数多く持つためである。内モンゴル自治区には、世界最大の軽レアアース鉱床であるバヤンオボ(白雲鄂博)鉱床が存在している。軽レアアース鉱床では、マグマの分別結晶作用を通じて軽レアアースを強く濃集し、総レアアース含有量は~10%にも達する。しかし非常にやっかいな問題は、トリウムやウランなどの放射性元素も同時に高濃度で濃集してしまうことである。軽レアアース鉱床は米国や豪州など世界中に分布するが、中国以外の国々ではこの放射性元素の処理がネックとなり、開発が困難となってしまうことが多い。

さらに中国には「イオン吸着型鉱床」と呼ばれる重レアアース鉱床が存在する。高温多湿の中国南部(主に江西省)において、花崗岩が風化してできた粘土鉱物にレアアースが吸着・濃集したものである。現在、重レアアース鉱床は中国南部にしか存在しない。このイオン吸着型鉱床は、軽レアアース鉱床と比べると、総レアアース含有量はかなり低い(0.05~0.2%)。レアアースの回収が極めて容易であるが、多量の抽出溶液の拡散による採掘地の環境破壊が深刻な問題となっている。このように、陸上のレアアース鉱床の開発は深刻な環境問題を抱えており、持続可能な資源開発の最大の障害になっている。

こうした状況の中、我々の研究グループは、太平洋の4,000 m以深の深海底にレアアースを高濃度で含有する泥(レアアース泥)が広範に分布していることを発見した。我々が発見したレアアース泥は、(1)中国のイオン吸着型鉱床の2~5倍の重レアアース含有量をもつ、(2)資

源量が膨大、(3)探査が容易、(4)トリウムやウランなどの放射性元素をほとんど含まない、(5)希塩酸や希硫酸で容易にレアアースが抽出可能で製錬が極めて容易など、まさに夢のような海底鉱物資源である。

太平洋全域から採取された2,000を超える膨大な数の深海底の泥試料について、誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)による全岩化学組成分析を行った結果、タヒチ周辺の南東太平洋とハワイを中心とした中央太平洋において、高いレアアース含有量を持つ泥が広く分布することが明らかになった。この2つの海域だけで、陸上のレアアース埋蔵量の1,000倍にも達する。

膨大な化学分析データを独立成分分析で解析した結果、レアアースを濃集させたメカニズムは、中央海嶺の熱水活動によって放出された鉄質懸濁物質とゼオライト鉱物の一種であるフィリップサイトによって、海水中のレアアースが吸着されたことであると判明した。泥に含まれるレアアースは鉱物相にゆるく吸着されているだけなので、希塩酸や希硫酸で容易に抽出できるのである。

太平洋で発見されたレアアース泥は、マスコミ報道では、公海上の資源であることが強調されていたが、実際にはそうではない。タヒチ沖の一部はフランスの排他的経済水域(EEZ)、ハワイ周辺海域は米国のEEZに属することに注意を払う必要がある。フランスは世界最高水準の海洋資源開発の技術を有しており、さらにレアアースの製錬技術にも優れているので、タヒチ沖でのレアアース泥の開発にいち早く動くであろう。

今年2012年6月28日、我々は日本のEEZ内である南鳥島周辺海域にレアアース泥の存在を確認し、その研究結果を公表した。この研究成果はNHKのトップニュースや読売、日経、朝日の一面記事として、大きく報道された。このEEZ内のレアアース泥は、コアの回収率が悪いためにその情報は断片的だが、Site 800という南鳥島の南西海域では、平均総レアアース濃度が1,070 ppmに達する泥が海底面下10 m以深に少なくとも10 m程度の層厚で分布している。Site 800周辺の1,000 km<sup>2</sup>の海域だけで、日本の国内消費量の230年分に当たる約680万トンのレアアースが存在すると推定される。これから需要が特に逼迫すると懸念される重レアアースのジスプロシウムは約400年分、テルビウムに至っては約4,600年分の

資源量である。また、南鳥島の北に位置する Site 198や、EEZからは外れるが Site 801においてもレアアース泥が確認されており、南鳥島のEEZ全体ではさらに膨大な量のおそらくは日本の国内消費量の数千年分から一万年分のレアアース泥が存在すると予想される。

もしこうしたEEZ内のレアアース泥を開発できれば、レアアースを自給する道がぐいに開けることになる。最大の問題の一つは、水深が5,000 mを超える深海底に存在するレアアース泥を揚鉱することができるかどうかであるが、同様の水深に存在するマンガンノジュールの採掘シミュレーション結果などに基けば、それほど難しくはなさそうである。また、今から30年ほど前の1980年代に、紅海の水深2,000 mに分布する硫化物泥の揚鉱がドイツの企業によって実証されており、一艘の船で年間約260万トンの泥が採れると試算された。我々は三井海洋開発との共同研究により、圧縮空気を送り込んで泥に空気を混ぜ、密度を軽くして引き上げるエアリフトという方法で、年間約300万トンのレアアース泥を一艘の船で採ることを目指している。これにより、レアアースの国内需要のほぼ10%を賄うことができるが、まずはこの量で十分であろう。日本がレアアース泥を採取すれば、中国はレアアースの輸出価格を下げることで、このプロジェクトをつぶそうとするはずである。その場合、日本としては、残りの国内需要の90%を充たすレアアースを中国から安く買えることになるので、総じて非常に得をすることになる。レアアース泥を採ることで仮に赤字が出たとしても、簡単に相殺することができる。日本がレアアースの価格をコントロールする調整弁を握ることができるのである。これこそ日本が執るべき資源戦略であろう。これらの詳細については、拙著『太平洋のレアアース泥が日本を救う(PHP新書)』をお読みいただければ幸いである。

まずは一刻も早く、南鳥島EEZ内の海域について重点的な資源探査を展開し、レアアース泥の資源ポテンシャルを把握することが重要である。レアアース資源が十分に確保できれば、既存のレアアース産業の更なる発展と新規のレアアース産業の創出を誘発し、日本再生の起爆剤になることが大いに期待されるのである。

(2012年12月18日 記)



このコーナーは各機関および会員からの情報をもとに編集しています。お近くの編集委員(目次欄掲載)または編集委員会 hensyu@aesj.or.jp まで情報をお寄せ下さい。資料提供元の記載のない記事は、編集委員会がまとめたものです。

## 安倍新政権が発足

第2次安倍内閣が2012年12月26日に発足し、経済産業大臣(原子力経済被害担当大臣)に茂木敏充氏、環境大臣(原子力防災担当大臣)に石原伸晃氏、文部科学大臣に下村博文氏が就任した。就任後の同日に行われた記者会見で安倍首相は原発政策について、「当面の電力需要にどう対応していくかをただちに検討していかねばならない。それを踏まえた上で、原子力規制委員会において半年間で、安全を第一とした厳しいルールをつくってもらい、今後3年間で原発を再稼働すべきかどうかという判断を進めていく。さらに10年間でベストミックスを考えていく」と述べた。

また茂木経産大臣は12月28日に経産省で行われた記者会見で「原発の安全性については規制委員会の専門的知見の判断に委ねるが、安全と認められたものについてはその判断を尊重し、再稼働を進める。それについては国が最終的な責任を持つ。新增設については今、判断するのではなく、今後の知見の蓄積などを見た上で判断していく」と述べた。

一方、原子力規制委員会の田中俊一委員長は2013年1月1日の年頭所感で、「発電用軽水炉の新基準については7月までにまとめる」との方針を示した。

(原子力学会編集委員会)

## 規制委員会、大飯と東通の破碎帯を調査

原子力規制委員会は2012年12月26日、東通原子力発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合を開き、東北電力は「敷地内断層の破碎帯は固結・岩石化しているため、少なくとも数十万年前には再活動していない」岩盤上に砂礫が堆積し、その後、膨潤による岩盤劣化部の膨張によってすき間が発生し、礫が入り込んだことが十分に考えられる」として、「変動地形は敷地内の断層活動によるものとは認められない」と説明した。

これに対し規制委員会の島崎邦彦委員長代理は、「こ

ういう可能性があるとの説明では、活断層の可能性が残る」として「活断層であることが否定できない」との判断を示した。有識者会合の委員である金田平太郎氏は「これが活断層であったとしても、非常に低い活動度だと推定される」と述べた。

また規制委員会は12月29日、関西電力の大飯発電所の敷地内破碎帯を現地調査した。破碎帯が活断層であるかどうかについては委員の間で見解が一致しなかった。

(同)

## 「原子力安全推進協会」が発足、代表に松浦元安全委員長

東京電力・福島第一原子力発電所事故から1年9か月、原子力業界の総力をあげて炉心溶融などの重大事故防止や新たな原子力安全向上策を検討する一般社団法人「原子力安全推進協会」(=原安進, JANSI)が2012年11月15日、発足した。電力会社やメーカーなどで構成し、いままでも原子力施設の相互安全レビューなどを行ってきた日本原子力技術協会(藤江孝夫理事長)を発展的に解消。「より高度な安全性を目指して、事業者を牽引していく組織」にすることを目指し、代表に松浦祥次郎・元原子力安全委員長が就任、理事長を藤江氏が務める。

新組織は、(1)技術評価において電力会社などの事業者の意向に影響されない独立性の仕組み・体制を構築、(2)事業者に対して客観的に評価、提言・勧告を行う——こ

となどによって、事業者が主体的に行う原子力安全性向上活動の支援を行うことで、事業者が独りよがりになることを防ぎ、我が国全体の原子力安全レベルを引き上げていくことを目指す。技術評価の独立性を確保し安全確保への強いリーダーシップを発揮するために、事業者の全社長が出席する「事業者社長会議」を発足させ、原安進代表が直接、各社長に提言・勧告を行い、改善策実行の約束を引き出す仕組みを構築する。また、その提言・勧告を受けた社長だけでなく他の社長も課題を共有し、お互い切磋琢磨することで業界全体としてのレベルアップを図る。

(資料提供：日本原子力産業協会、以下同じ)

## 原子力規制委、緊急被ばく医療検討開始

原子力規制委員会は2012年11月15日、緊急被ばく医療のあり方に関する検討を開始した。同委がこのほど策定した原子力災害対策指針を受け、医療協力体制や発災時におけるスクリーニング実施、安定ヨウ素剤の服用などについて、有識者の意見を聴取し必要事項を取りまとめるもの。

同指針が掲げた今後の検討事項のうち、緊急被ばく医療以外の項目については別途、有識者チームを立ち上げ

検討を行うが、いずれも年内を目処に、指針に反映させるべき内容を取りまとめる運びだ。

初回合会では指針中の緊急被ばく医療関連の記述を踏まえ、検討課題について整理した。医療協力体制に関しては多数の傷病者への迅速な対応を可能とするよう、災害医療や広域医療機関との連携・指揮系統、医療設備、資機材、教育・訓練、情報の取扱いなどを掲げ、救急医療の流れを図示して、意見を求めた。

## 原子力規制委、有識者から意見を聴取

原子力規制委員会は2012年11月21日、有識者との意見交換を公開の場で初めて行った。同委に求められた専門性・独立性の向上の一方、「独りよがりにならないよう」高い透明性の担保を目指し、外部からの意見を求め活動の参考に資するもの。

意見聴取で浅岡氏は、他産業のリコール制度とも対比しながら、今後のバックフィット制度運用に言及。最近、規制委で論点となりつつある指針類改定の議論が十分になされるよう、安全確保の法的枠組みに関連する意見を述べた。

安全規制行政改革に携わった飯田氏は、同委自ら「あの現状(福島災害)を防げる組織なのか問いかける」必要を指摘した。

民間事故調査委員会の取りまとめにあたった船橋氏は、これまでの規制ガバナンスの問題点を指摘した上で、今後、独立性・専門性を高め安全規制でリーダーシップをとっていくことは「非常に難しい」と述べたほか、国際事故調を立ち上げるなど、諸外国と「一緒に育っていく」ことも提案した。

## 福島県が核燃料税を廃止、全国で初めて

東京電力・福島第一原子力発電所の事故を受け、福島県は2012年末に5年毎の課税期限がくる核燃料税の更新を行わないと2012年11月19日に発表した。

県として県内全10基の廃炉を求めていることや、県議会でも全基廃炉の請願が採択されていることを踏まえての判断。原子力発電所が立地する全国13道県のうち、核

燃料税の課税を廃止するのは同県が初めて。

核燃料税は地方税法に基づく法定外普通税として77年に創設され、同県ではこれまでに総計約1,247億円、近年は約53億円の税収を見込んできた。立地・周辺地域の安全・防災、民生安定対策、産業振興対策など、多種多様な財政需要に充ててきている。

## 東電、Jヴィレッジに「福島復興本社」

東京電力は2012年11月29日、原子力災害に伴う損害賠償や除染活動など復興関連業務を統括する「福島復興本社」を、2013年1月1日付で設立すると発表した。同日の取締役会で決定した。

「福島復興本社」は「Jヴィレッジ」(福島県双葉郡楢葉町)内に拠点を置き、福島市、いわき市、郡山市、会津若松市、南相馬市の5地点に整備する地域事務所とも連携する。また13年末を目処に500人規模の要員増強を図り、県内の火力・水力各発電所の協力のもと、総勢4,000

人以上の体制を敷き、地域からのニーズにきめ細やかに対応し、福島の復興に向けた取組みを強化させていく。

復興本社の代表には石崎芳行副社長が就任し、これまでの福島原子力被災者支援対策本部も改組・編入させた「福島本部」を設置。同本部には企画総務部、福島原子力補償相談室、除染推進室、復興推進室、福島広報部を置き、本店各部門と経営スタッフ機能等を一部移転し、トップマネジメントの強化を図る。

## 海外情報 (情報提供：日本原子力産業協会)

[米国]

### NRC, ドレスデン原発洪水対策の改善を指示

米原子力規制委員会(NRC)は2012年11月1日、イリノイ州で稼働するドレスデン原子力発電所における洪水対応計画について、同委の懸念事項に鋭意取り組むよう所有者のエクセロン社に書簡で指示した。福島事故後に行われた短期タスクフォース審査への対応の一環として、最悪の洪水に際しても冷却ポンプを作動させ、洪水の瓦礫から機器を守るため、30日以内に取組み方針を示すよう求めている。

ドレスデン原発の2基は福島と同じマークI型の格納容器を採用。福島事故に伴い、NRCが同原発で最近実施した検査では複数の懸念分野が特定されたが、その中で問題となったのが、最も過酷な気象学的と水理学的条件が組み合わさった際に想定される最大レベルの洪水、「最大推定洪水」だ。

こうした条件がこの地域で発生したことは一度もなく、これからもほとんど起こり得ないと考えられるため、NRCは同原発での洪水対応計画が緊急を要する安全問題とは捉えていない。このため、ドレスデンの対応計画は同原発が福島事故に則した安全基準を満たしていることをNRCが保証するため、追加で情報提供する分野という位置付けになる。

### NRC, ハリケーン対応でオイスタークリークに再調査命令

米原子力規制委員会(NRC)は2012年11月13日、ハリケーン「サンディ」により、10月に警戒宣言が発令されたエクセロン社のオイスタークリーク原子力発電所で特別点検を開始した。緊急に安全上の懸念があったわけではないが、取水口近くで水位が規定値を超えた際の現場活動や手順について詳細に審査するとしている。

「サンディ」が10月29日に東海岸を通過した際、同発電所は燃料交換と保守点検のため計画停止中。「サンディ」による高波と風向き、上げ潮が重なったため、取水口近くの水位は午後7時頃に基準海面から4.5フィート上まで上昇。運転員は4段階の警戒宣言の一番下である「異常事象」を宣言した。午後9時前に水位が6フィート上に上昇し、警戒宣言は下から2番目に引き上げられたが、水位は翌30日の朝、同宣言の解除レベルまで低下していた。

NRCでは今回、3名の検査官チームを同発電所に派

遣し、「サンディ」通過時に常駐検査官が行った審査を一層詳細に実施する。水位の上昇がどのようにモニタされ、どのようにそれらの情報が伝達されたかなど、警戒宣言を巡る活動の状況に審査のポイントが置かれている。

[英国]

### 原子力規制庁が EDF の計画に サイト許可

原子力規制庁(ONR)は2012年11月26日、EDF エナジー社がサマーセット州で進めているヒンクリーポイントC原子力発電所建設計画に対してサイト許可(NSL)を与えた。原子炉建設サイトへの許可としては25年ぶりで、同国における原子力新設計画は最初の2基の建設に向けて大きく前進。安全性に関わる部分の実質的な着工までには、NSLに基づくONRのさらなる承認、および環境庁と担当大臣からも環境認可と同意が必要だが、同サイトに建設予定の仏アレバ社製・欧州加圧水型炉(EPR)は包括的設計審査の最終段階に入っており、設計上の課題解決で追加情報が提出されれば、年内にも規制当局が最終承認を与える見通しとなっている。

実際のNSLは、EDF社が英国のセントリカ社との合併で原子炉新設用に起ち上げたNNBジェネレーション社に与えられたもので、ONRのM・ウェイトマン長官はサイトの適性のほかに、同社の組織体制や安全評価書の準備能力、NSLに付随する条件への対応力などの審査に3年以上の年月を費やしたと説明。同社は今後、英国の規制要件に合わせたEPRを既存のヒンクリーポイントB原子力発電所の隣接区域に2基建設するため、原子炉の建設から運転に至る炉寿命全般で安全性を確保する適切なメンテナンスなど、36の条件を遵守していくことになる。

また、建設計画全体に対する政府の同意も必要だ。都市計画案の審査を担当する計画審査庁は2012年9月、半年間にわたったEDF社の建設運転申請の審査を終了し、12月21日までに、同計画の推進をエネルギー・気候変動(DECC)大臣に勧告することになった。EDF社も9月に、周辺環境への影響緩和支援として地元サマーセット州の関係自治体に約1億ポンド(約130億円)提供することで合意。これは主に地元の教育振興や道路交通整備などに活用されるとしている。

## 政府が電力市場改革法案

英国エネルギー気候変動省(DECC)のE・ディビー大臣は2012年11月29日、電力の安定供給を維持しつつ原子力発電等の利用による低炭素経済への移行を目指した電力市場改革(EMR)法案を国会での審議に回したと発表した。低炭素電源による電力を固定価格で差金決済するなど、不確定要素を減ずることによって、原子力の新設計画を含む英国のエネルギー・プロジェクトに多くの投資家を惹き付けるのが主な目的。女王の裁可を経て来年中に発効すれば、2014年にも同法案に盛り込まれた多くの施策が本格的に実行に移されることになる。

英国の電力供給体制は現在、送電部門を除く発電および小売部門が全面的に自由化された垂直統合型。これら両部門の事業者は、2008年に英国内のほとんどの原子力発電施設を手中に収めたEDF エナジー社を含む大手電力6社に統合され、市場シェアの9割以上を占有している。

こうしたなかで、国内の既存の発電設備は今後10年間に5分の1が閉鎖時期を迎える一方、電力需要は輸送部門を中心に増加していく見通し。2020年までに発送電部門で1100億ポンドの投資が必要と見られているが、現在の電力市場体制で必要とするだけの規模とペースで投資を呼び込むことは難しいと政府は考えている。

また、EU指令を受けて、同じ時期までに温室効果ガスの排出量を34%削減するという低炭素移行計画を09年に発表したことから、政府は2011年7月、原子力や再生可能エネルギー、二酸化炭素の回収・貯蔵(CCS)が可能な火力といった電源の開発支援を目的としたEMRに着手していた。

### [フランス]

## 安全規制当局、シュベ委員長を正式に任命

仏原子力安全規制当局(ASN)は2012年11月12日、大統領令によりP-F・シュベ氏が9日付けで正式にASNの委員長に任命されたと発表した。前任のA-C・ラコステ委員長の任期切れに伴うもので、これから6年間の任期を務める。

また、同様に任期が満了したM-P・コメ委員に代わり、議会・下院議長から指名を受けた放射線防護・原子力安全機構(IRSIN)の疫学者であるM・ティルマルシュ氏が、同日付で委員に正式任命された。ASNの委員は5名で、このうち3名は大統領が指名。残りの2名は下院議長と上院議長が1名ずつ指名する。

## エネルギー法案策定に向けた全国民的議論を開始

フランス環境省が2012年11月26日、F・オランド政権が公約した「2025年までに原子力の発電シェアを50%に削減」を実行に移すため、エネルギー源の移行に関する国民評議会の第1回会合を正式に開催した。

関連する労働組合や環境NGO、消費者団体、商工会議所、関連自治体および議員らと交え、2025年までのエネルギー構成要素の在り方やエネルギー源の移行に要する資金調達等について、月1回のペースで国民的議論を実施。D・パトール環境相のほかにアレバ社のA・ローベルジョン前CEOを含めた7名による委員会がこれを運営し、来年にもフランスの新たなエネルギー法案を議会に提出する方針だ。

### [チェコ]

## 新たなエネルギー政策、30年後に原子力シェア5割に

チェコのP・ネチャス首相は2012年11月8日、同国の新しいエネルギー政策を閣議決定したと発表し、2040年までに原子力発電シェアを少なくとも50%まで拡大する戦略が含まれることを明らかにした。現在、建設工事の入札作業中であるテメリン3、4号機の完成に加え、ドコパニ5号機を増設することを前提としたもので、これにより高経年化した石炭火力設備への依存を下げるのが主なねらいだ。

この発表は閣議による承認後、産業貿易省のM・クバ大臣を伴った記者会見の席で行われた。同首相によると国家エネルギー政策案は産業貿易省・専門家作業部会との協力で策定したもので、今後、最終決定するための承認手続きに回されることになる。

同政策の基本戦略は産業界のみならず、国民一人一人のためにエネルギー価格を許容レベルで維持するという保守路線であり、チェコの発電産業を合理的な物理原則により維持するという内容。バランスの取れたエネルギー構成の達成が戦略的な優先事項だとしており、電力の8割は国産の資源で賄う方針である。

このため、2040年までに総発電電力量に対する原子力発電量のシェアを現在の33%から少なくとも50%まで拡大し、現在6割を占めている石炭火力のシェアを20%まで削減する。同国内の石炭火力発電所は経年劣化しつつあることから、今後の利用は主に、熱供給が効率的と思われるエリアに集中していくことになる。

ここで前提となるのは、現在チェコ電力公社(CEZ)がテメリン原発を進めている3、4号機の完成計画だ。現

在、ウェスチングハウス(WH)社製・AP1000、ロシアとチェコの企業が提案するMIR1200を候補に入札を実施しており、2020年頃までにこれらの2基を完成させるとともに、既設の2基を加えた同発電所の全4基で運転寿命の延長も計画。長期的にはドコバニ原子力発電所の4基に5号機を加えることも視野に入れるとしている。

## チェコ電力、テメリン増設で建設許可申請を提出

テメリン原子力発電所3,4号機の完成計画で採用設計の入札を実施しているチェコ電力(CEZ)は2012年11月30日、両炉の建設許可申請書を政府の原子力安全局(SUJB)に提出した。同国の原子力法に基づく許認可手続きで、CEZはこれに伴い、入札保証報告書も同日に提出。SUJBによる両文書の審査を通じてメーカーの選定手続きや環境影響評価など、同計画の詳細情報について最大限の透明性と公開性を図ることが目的だ。

入札保証報告書は830頁という膨大な量の文書で、CEZや原子力研究協会の専門家35名が作成に参加。建設サイトの気候や地質学的、水理学的、および地震学的状況など自然条件のほかに、地元でのガス採掘や産業生産品といった近隣住民の活動も含めた特性を主に記述・評価する内容だ。また、3,4号機完成計画のコンセプトや品質問題、工事に伴う交通量による環境影響に加えて、廃止措置オプションや放射線防護の分析も網羅。CEZは同報告書の最も重要な成果は、規制上のすべての基準を満たすことになる新設炉の設計原則が固まった点だと指摘した。

建設作業が一時期中断していた同計画では、2009年にCEZが改めて公開入札の手続きを開始。10年春までに第1段階の適性条件をクリアした①ウェスチングハウスの企業連合(AP1000)、②仏アレバ社(EPR)、③ロシア企業とチェコのスコダ社の連合(MIR1200)——に対して昨年11月に詳細な入札招請書を手渡した。しかし、CEZは2012年10月にアレバ社の提案書を不適格として候補から除外。アレバ社は入札への再参加を求めて提訴に及んでいる。

### [リトアニア]

## 首相候補がピサギナス計画破棄表明

2012年10月にリトアニアで行われた国会議員選挙の結果、新政権の首相候補となっている社会民主党(LSDP)のA・プトケピチウス党首は11月4日、同党のウェブサイト上で「国民投票結果を考慮し、LSDPはピサギナス原子力発電所を建設すべきでない」との考えであることを明らかにした。

10月14日に議員選挙と併せて実施された国民投票では、投票者の6割がピサギナス建設計画に反対意見を表明。法的な拘束力を持つものではないが、プトケピチウス党首は前政権のエネルギー政策を完全な失策と評価するとともに、LSDPの原子力新設計画に対する立場は明解であり、国民が意志を示した投票結果を無視することは政治的にも道徳的にも間違っていると断言した。

ただし、同氏は選挙直後に「原子力には反対しないがピサギナス計画の経済性には疑問」とコメントし、同計画の最終的な価値計算等に関して冷静な議論が必要だと指摘した模様。地元誌のインタビューに対しても、ピサギナス原発をリトアニアに建設すべきでないとする法案を議会にかけの方針を表明する一方、「そのうち米国でいくつかの原子炉が認可を受けることだし、それらをリトアニアに建設することもあり得る」と述べるなど、将来的に原子力発電を利用する可能性を残したと伝えられている。

### [ヨルダン]

## 原子力導入計画、国内ウラン資源を活用へ

ヨルダン原子力委員会(JAEC)のK・トゥカン委員長は2012年11月10日、国営ペトラ通信のインタビューに応え、政府が進めている原子力導入計画はヨルダン王国の今後のエネルギー確保を目的とした戦略的選択だとして、その正当性を主張するとともに、同計画に国内のウラン資源を最大限に活用する考えを表明した。

トゥカン委員長によると、同国内では有望なウラン鉱床が発見されており、「経済的な実用性のある分量がある」。国土の中央部に確認された品位2~2.5%のウラン2万トンにより、原子力導入計画の実行を支援できると断言。電力の安定供給と自立の達成が可能になると強調している。

同委員長はまた、マジュダルでの商業炉建設に先立つ運転員教育用として、ヨルダン科学技術大学で熱出力5,000kWの研究訓練炉(JRTR)を建設中である事実に言及。韓国製・新型高速中性子応用炉(HANARO)となる同炉は2015年に完成予定で、総工費1億3,000万ドルのうち7,000万ドルを韓国から低金利融資を受けている。しかし同委員長は、同コストの少なくとも半分をカバーできる戦略的パートナーを模索中だとしており、こうした方策を通じて国庫への負担を軽減する考えを示した。

経済協力開発機構・原子力機関(OECD/NEA)と国際原子力機関が2012年7月に刊行した「ウラン・資源と生産および需要(通称=レッド・ブック)」最新版によると、ヨルダンはウラン濃縮する権利の放棄を拒絶。JAECが発足した2008年に、仏アレバ社と国内ウランの探査共同

事業者「JFMUC」を起ち上げており、09年から始まった中央部の探査活動も第2段階に入ったと見られている。

### [韓国]

## 霊光5・6号機で品質保証偽造部品が判明

韓国の知識経済省は2012年11月5日、2003年から12年までの間に原子力発電所用の部品納入業者8社が部品とともに提出した海外の品質保証機関の保証書60件が偽造だったことが判明したと発表した。虚偽の品質保証を受けた未検証品はヒューズやスイッチ、タイオードなどの一般産業用品目で、その98%が設置された霊光5,6号機は直ちに運転を停止し、年末までに部品交換を終えることになった。

これらの部品は一般規格品であるため、発電所の安全性に直結する設備には使用できず、すべて原子炉建屋外の補助設備で使用。これらの部品で誤作動などの問題が発生した場合でも、放射能漏れのような重大な事故に発展するおそれはないと説明している。

この事件は、同国で稼働する原子炉23基すべてを所有する韓国水力原子力会社(KHNP)が外部から情報提供を受けて確認したもの。偽造された品質保証書は海外の12の検証機関のうちの一つに集中しており、合計品目数は237。製品価格にして8億2,000万ウォン(約5,700万円)に相当し、全体の95%が欧米で製造されたものだ。これらのうち136品目が実際の原子力発電所に使用されており、98.4%が霊光5,6号機に、また、霊光3,4号機および蔚珍3号機でも一部に使用されていた。

KHNPでは今回の未検証品を全面的に交換する方針で、早速、作業に着手。霊光5,6号機の場合は未検証品が広く使われていて全体的な安全点検が必要であるため、運転を停止した状態で行う。

一方、霊光3,4号機および蔚珍3号機は、取り付け位置を確認した結果、多重化装置に使われていることが判明しており、運転中の部品交換が可能。未検証品の使用個数も少なく、交換部品は確保済みとなっている。

### [オーストラリア]

## 経済開発委員会、原子力利用の準備を勧告

原子力発電所を持たないオーストラリアで将来的な原子力の利用に向けて、検討の必要性を示唆する意見が出された。同国政府の独立した立場の非営利経済シンクタ

ンクであるオーストラリア経済開発委員会(CEDA)は2012年11月14日、同国の将来のエネルギー・オプションについて調査した報告書を公表し、「オーストラリアが温室効果ガスの影響緩和に本腰を入れるのであれば、原子力という選択肢についても検討しなくてはならない」と表明した。

原子力には低コストでクリーンなベースロード電源となる潜在能力があると指摘しており、再生可能エネルギーやその他のクリーン・エネルギー源が実現しなかった場合、原子力が重要なバックアップ・エネルギー源になると強調している。

同報告書・最終版の公表はちょうど、オーストラリアの連邦政府がエネルギー白書を発表した1週間後というタイミングだったことから、CEDA最高責任者のS・マーチン教授は「白書から原子力が除外されたのは重大な手抜きだ」と評価。原子力はCEDA報告が扱っている重要課題の一つであることを明確に示すとともに、将来、原子力が必要となった際、これを利用することが可能になるよう、今から規制枠組の構築など対策を打っておくことが重要だと勧告している。

同報告書によると、石炭やガスなど安価なエネルギー資源の豊富なオーストラリアでは、原子力は歴史的に選択肢として考慮する必要性がなかった。しかし、地球温暖化への取組がこの傾向を変化させており、低炭素経済への移行を目指す上で原子力をオプションとしないのは、経済や環境に対する破壊行為とも言えると断言している。

核燃料資源国としての潜在能力について同報告書は、「オーストラリアには世界の原子燃料サイクルの中で一層根本的な役割を果たす機会があり、ウランの販売という経済機会のほかに、その貯蔵で対価を得ることも可能だ」との見解を表明。究極的には現時点で廃棄物と扱われている物を次世代原子炉の燃料源として販売することもできるとして、燃料サイクルで様々な事業の機会があると示唆した。

一方、オーストラリア国内に原子力発電所を建設し、そこから利益を得る可能性に関しては、「いくつかの課題に取り組まねばなるまい」と言明した。例として、第3世代プラス原子炉の財政的な実行可能性に加えて、適切な資格のあるエンジニアや社会的な実施権の不足などを列挙。将来世代の原子炉が高いレベルの安全性を確保しつつクリーンなエネルギーを供給できるとすれば、小型モジュール炉(SMR)の利用こそオーストラリアにとって財政的に実行可能なオプションかもしれないと指摘している。



特集

## 放射線防護に用いられる線量概念

放射線工学部会 線量概念検討ワーキンググループ

福島第一原子力発電所の事故以来、マイクロシーベルト、ミリシーベルトなどの放射線量の単位がテレビや新聞でよく報道されるようになってきた。しかし、シーベルト(Sv)で表される放射線量として、放射線健康リスクに関連のある防護量(実効線量など)と、測定値と関連のある実用量(周辺線量当量など)という2種類の異なった線量概念があることは、原子力分野の専門家の間でも、必ずしも正しく理解されていない。これらの線量概念について概説する本特集は3編からなり、「線量概念の概要と防護量」および「実用量と防護量」ではICRP/ICRUによって構築されてきた防護量、実用量などの放射線防護線量体系を解説し、「福島等で使用されている線量計と防護量の関係」では福島事故対応に関連した地表面、地中浸透のセシウム汚染に対応した場の線量計(サーベイメータなど)および個人線量計の実測値から実効線量を求めるための換算方法とその課題について解説する。なお、本特集では、必要があれば読者が原典に戻れるように、可能な限り根拠となる参考資料を明示して記述する。

## 線量概念の概要と防護量

本稿では、物理量に基礎を置きながら ICRP/ICRU によって構築されてきた線量概念である防護量と実用量を含む放射線防護線量体系全体を説明し、その中で放射線健康リスクと関連のある線量概念である防護量(実効線量など)の成立の経緯について解説する。

### I. 概論

#### 1. グレイとシーベルトが使用される分野

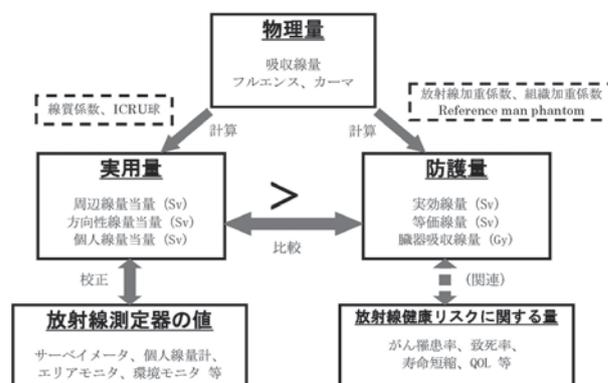
放射線被ばく量の指標である「線量」は、使用される分野と目的によって異なった単位が用いられる。例えば、放射線生物学、放射線物理学、放射線治療等の分野では主にグレイ(Gy)という単位が使用される。一方、通常の放射線防護の分野では、シーベルト(Sv)という単位を用いて線量が表されるが、医学検査による被ばくでも使用されることがある。なお、放射線による被ばく事故の線量を表す場合、被ばく状況によりグレイまたはシーベルトが用いられる。グレイは、放射線による単位質量あたりの吸収エネルギーを表現する基本的な物理指標である「吸収線量」という概念に使用される単位である。シーベルトは、人の放射線健康リスクと関連を持つ放射線防護の線量概念に用いられる単位である。

#### 2. 放射線防護に使用される種々の線量の関係

放射線防護に使用される線量概念には、大きく分けて2種類の量がある。ひとつは国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)が定義する「防護量」(protection quantity)であり、もうひとつは国際放射線単位および測定委員会(International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU)が定義する「実用量」(operational quantity)である。防護量は、線量当量の概念から始まり、実効線量当量を経て、等価線量、実効線量へと発展した線量概念であり、人の放射線健康リスクと関連付けた指標として、放射線防護のために線量限度と比べる量である。一方、実用量は、最大線量当量(maximum dose equivalent: MADE)に始まり、線量当量指標を経て、場のモニタリングのための周辺線量当量および方向性線量当量、また個人モニタリングのための個人線量当量が用いられるようになった。

防護量である実効線量と等価線量、臓器吸収線量は、照射条件がわかれば計算で求めることができる量である。しかし、これらの量は実測可能な量ではないため、放射線モニタリングには直接使用できない。そのため、防護量の評価のために実用量が、ICRPの1977年の勧告(ICRP Publication 26)に応じて開発された。この実用量の目的は、防護量の推定値を提供すること(ICRU Report 39とICRU Report 43)と、モニタリングに用いる線量計の校正目標量として使用することである<sup>1)</sup>。

実用量は、場のモニタリング用(エアモニタリング)として周辺線量当量と方向性線量当量が使用され、人体の装着する個人線量計を用いる個人モニタリングには個人線量当量が用いられる。実用量は、防護量の推定値を適切に表す測定可能な量として、防護量を下回らないように設定されている。しかし、人体の後方から放射線が入射するような場合には、個人線量当量は実効線量よりも明らかに小さな値を示すことがあることも注意が必要である。放射線防護に直接係わる防護量と測定に係わる実用量は、放射線に関する基本物理量(フルエンス、カーマ、吸収線量など)と計算(換算係数<sup>a)</sup>)によって関連付けられる。これら3者の量の関係を第1図に示す。



第1図 放射線防護に係る三種類の量の関係

*The Concept of Dose System for Radiological Protection*  
 –Radiological Protection Quantity; Working Group on  
 the Concept of Dose under the Division of Radiation Science  
 and Technology.

(2012年 11月14日 受理)

<sup>a</sup> 換算係数は、物理量である粒子フルエンス、または同様に物理量である自由空気中の空気カーマで規格化されて表現される。

## Ⅱ. 防護量の概念

### 1. 防護量の体系

防護量は、物理量を基本として放射線健康リスクと関連性を持たせた指標であると考えることができる。被ばくを受ける各器官または組織の防護量が等価線量であり、全身の防護量が実効線量である。

等価線量  $H_T$  は、組織・器官の放射線  $R$  による平均吸収線量  $D_{T,R}$  を放射線生物学の知見に基づき、放射線の種類の違いによる確率的影響と関連を持つ放射線加重係数  $w_R$  で加重合計した量であり、(1)式で表される。

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (1)$$

実効線量  $E$  は(2)式に示すように、組織・器官の確率的影響に関する放射線感受性を示す組織加重係数  $w_T$  を用いて、等価線量  $H_T$  を加重合計したものであり、確率的な健康影響と関連を持つ指標と考えることができる。

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (2)$$

以上で述べた防護量の体系を第2図に示す。

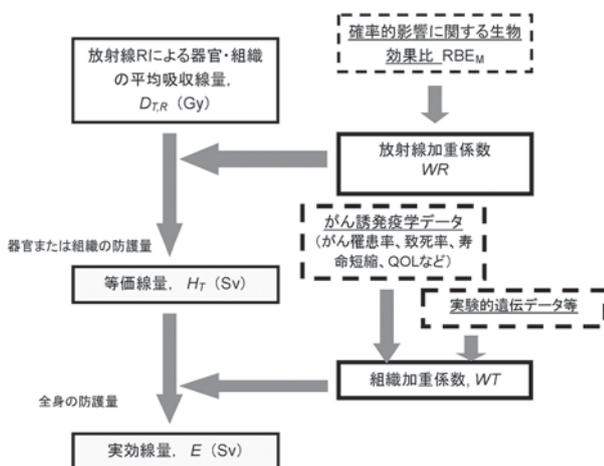
### 2. 放射線加重係数

組織・器官の吸収線量が同じでも、放射線の種類が違くと影響も違ってくる場合がある。放射線加重係数は、放射線防護上で最も大きな関心事である確率的影響に焦点を当て、放射線の種類の違いによる差を補正するための係数である。この放射線加重係数は、これまでに様々な議論や変更を経て現在使われている形になった。以下に、その経緯を解説する。

放射線加重係数  $w_R$  の設定においては、低線量被ばくの確率的影響に関する生物効果比 (relative biological effectiveness: RBE) の最大値  $RBE_M$  が重要な意味を持っている<sup>2)</sup>。RBE の概念は、1931年に Fillia と Henshaw が放射線生物学の分野で最初に使用した<sup>3)</sup>。次に1945年には、Cantril と Parker が異なった種類の放射線からの害

(harm) の程度を比較する生物学的な相対係数 (relative biological factor) を示した<sup>4)</sup>。放射線防護の分野では、ICRP が1950年の勧告で基準放射線 (0.5 mm 厚白金で覆ったラジウムからの  $\gamma$  線) と同等の生物学的効果を起こす吸収線量の逆比として生物学的相対効率 (relative biological effectiveness) を定義した<sup>5)</sup>。また1954年には、ICRP は生物効果比 (relative biological effectiveness) という用語を用いた<sup>6)</sup>。

放射線生物学と放射線防護では、当初からやや異なった目的で RBE が使用されてきた。放射線生物学では、同じ生物学的影響を発生させる線質 (放射線の種類やエネルギー) の異なった2種類の放射線の吸収線量の比として扱われ、その値が関心の対象となった。しかし、放射線防護の分野では、RBE は線質の異なった放射線の吸収線量に乗じる係数として位置付けられ、放射線防護上関心のある線量範囲で、線質の異なる放射線による線量の比較と加算を可能にした。ICRU は、1959年に ICRU Report 9 で RBE は放射線生物学でのみ使用する用語とし、1962年には ICRU Report 10a で RBE の概念を放射線防護の目的では線質係数と呼ぶこととして、 $QF$  という記号を提案した。この段階で、線質係数は放射線生物学的な評価値である RBE から分離された。1977年の ICRP 勧告 (ICRP Publication 26) では、線質係数を確率的影響に関連付けた係数とし、ICRU Report 19 では  $QF$  に替えて  $Q$  という記号を用いた。ICRU Report 40 では、ヒトのリンパ球の二動源染色体異常に基づく  $RBE_M$  のデータから線質係数  $Q$  をマイクロドジメトリー<sup>b</sup> で測定可能な線エネルギー  $y$  (細胞、細胞核レベルの微小体積中に吸収された電離放射線のエネルギーをその微小体積を横切る平均飛程長で割った計測量であり、確率分布を持つ統計量) の関数として提示した。1990年の ICRP 勧告 (ICRP Publication 60<sup>7)</sup>) では、線エネルギー  $y$  ではなく、 $Q$  を水中の荷電粒子の線エネルギー付与  $L$  (Linear Energy Transfer: LET; ある物質中を通過する荷電粒子が経路の単位長さあたりに失う平均エネルギーであり、統計的確率密度分布は持たない量) の関数に変換した  $Q(L)$  を勧告した。それに加え、放射線防護の現場での便宜性の観点から、放射線加重係数  $w_R$  という新たな係数を導入した。放射線加重係数は、外部被ばく、内部被ばくを問わず、線質による効果の違いを表すため組織・器官の平均吸収線量に掛けて防護量である等価線量の計算の目的に用いられる係数であり、線質係数と似た概念であるが、LET の関数という概念から切り離されている点が大きく異なる。一方で、線質係数  $Q(L)$  は実用量の計算に引き続き用いられる係数となった。ICRP



第2図 防護量の体系

<sup>b</sup> 放射線による生物影響を調べる手法の一つで、細胞、細胞核、染色体、DNA など微小なターゲットへの放射線損傷のメカニズム等を研究するための微視的な吸収線量計測学の分野。

の1990年勧告の段階では、放射線加重係数  $w_R$  と線質係数  $Q(L)$  の整合性は十分には考慮されていなかった。しかし、ICRP の2007年勧告では、整合性を考慮して、中性子と陽子の放射線加重係数の値を線質係数  $Q(L)$  との整合性が取れる方向で変更された。ICRP の2007年勧告 (ICRP Publication 103<sup>8)</sup>) の放射線加重係数の値を第1表に示し、中性子の放射線加重係数を第3図に示す。

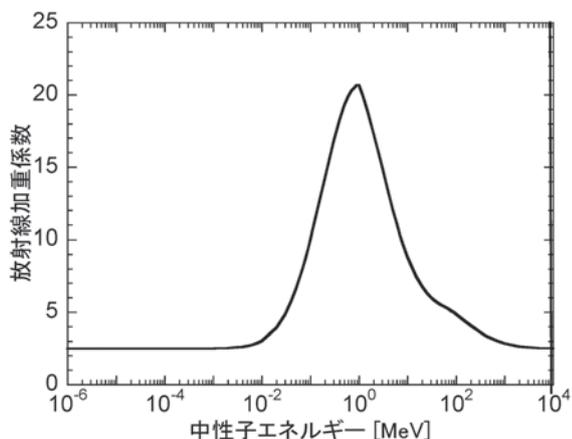
### 3. 組織加重係数

放射線加重係数  $w_R$  は、確率的影響に関して組織・器官に依存せず放射線の種類だけに依存する係数である。他方、人体の組織・器官に割り振られた組織加重係数  $w_T$  は、確率的影響に対する相対的な放射線感受性を表す係数であり、合計すると1になるように設定されている相対値である。組織加重係数は、等価線量から実効線量を求めるために導入された係数である。

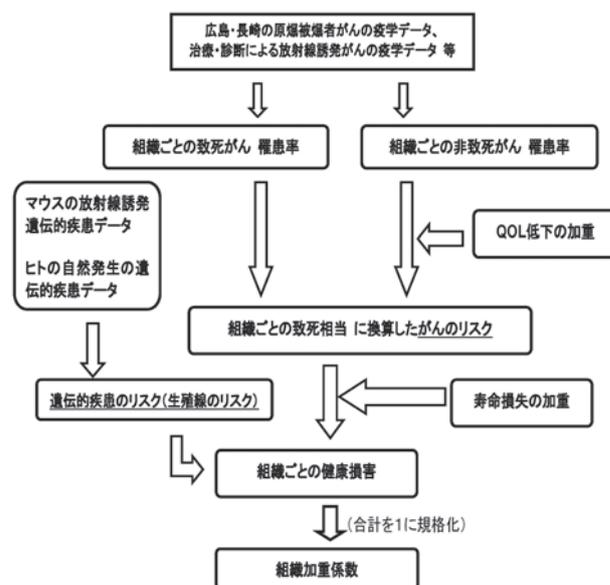
組織加重係数は、組織・器官ごとのがんや遺伝的影響などの確率的影響から評価した係数として、当初“weighting factor (荷重係数と訳していた)”という名称でICRP の1977年勧告 (ICRP Publication 26) で導入された。その後、原爆被爆者等のがん死亡率等の疫学データ等の改定に基づいて、1990年勧告 (ICRP Publication 60) で数値が改定され、2007年勧告 (ICRP Publication 103) でも、致死がん・非致死がんの罹患率、致死割合、寿命損失および生活の質 QOL (Quality of Life) を考慮したなど、疫学データ等の改定に基づいて再度改定された。ICRP の2007年勧告で使用された組織加重係数の求め方を第4図に示す。

第1表 ICRP の2007年勧告の放射線加重係数

放射線の種類	放射線加重係数
光子	1
電子とミュオン	1
陽子と荷電パイ中間子	2
$\alpha$ 粒子, 核分裂片, 重粒子	20
中性子	第3図に表示



第3図 ICRP の2007年勧告の中性子の放射線加重係数



第4図 ICRP の2007年勧告における組織加重係数の求め方

1990年勧告から2007年勧告への大きな変化は、放射線誘発遺伝性疾患はヒトでは実証されていないことが原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR) の2000年報告書<sup>9)</sup>で結論付けられたこと、遺伝的疾患のリスクが下がったこと、乳房のがんリスクが増加したことであり、それらは組織加重係数の数値改定に反映された。両勧告の組織加重係数の値を第2表に示す。

このように、防護量である等価線量および実効線量を求めるために使用される2種類の加重係数は、がんや遺伝性疾患などの確率的影響に関連した係数であり、白内障、皮膚・骨髄障害など発生するしきい値 (しきい線量) を持つ確定的影響 (組織反応) を反映した係数ではない。しかし、組織反応のRBEは一般的に、確率的影響を反映した放射線加重係数よりも小さい値であるため、放射線防護の対象となる被ばくでは、組織反応 (確定的影響) に対する眼と皮膚の線量限度は、放射線加重係数を使用した等価線量で表されている。

第2表 組織加重係数の値

組織加重係数 $w_T$	ICRP の1990年勧告で該当する組織又は器官	ICRP の2007年勧告で該当する組織又は器官
0.20	生殖腺	—
0.12	赤色骨髄、結腸、肺、胃	乳房、赤色骨髄、結腸、肺、胃
0.08	—	生殖腺
0.05	乳房、甲状腺、食道、肝臓、膀胱	—
0.04	—	甲状腺、食道、肝臓、膀胱
0.01	骨表面、皮膚	骨表面、皮膚、脳、唾液腺
	残りの10組織・器官: 0.05 副腎、脳、大腸上部、小腸、腎臓、筋肉、脾臓、脾臓、胸腺、子宮	残りの14組織・器官: 0.12 副腎、胸腔外(ET)領域、胆嚢、心臓腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、脾臓、前立腺、小腸、脾臓、胸腺、子宮頸部

### Ⅲ. 防護量と放射線健康リスク

防護量は、確率的影響による致死率などの放射線健康リスクと関連を持つ指標であると考えられる。ICRPは2007年勧告で、約100 mSvを下回る低線領域において、確率的影響であるがん又は遺伝的影響の発生確率は、臓器または組織が受ける等価線量の増加に正比例して増加するという見解を支持すると表明している。そこでICRPは、通常の放射線管理の対象となる100 mSv以下の被ばく線量域では、受けた線量と確率的影響の発生率に比例関係があるという線形しきい値なしモデル(Linear Non Threshold model: LNTモデル)の仮説に基づいて実用的な放射線防護を行うことを勧告している。原子力安全委員会はICRPとUNSCEARに基づいて、低線量影響について以下のようにまとめている<sup>10)</sup>。すなわち、広島や長崎での追跡調査に基づく疫学データの結果からは、100 mSvを超える被ばく線量では被ばく量とその影響の発生率との間に比例性があると認められているが、100 mSv以下の被ばく線量では、発がんリスクが見込まれるものの、統計的な不確かさが大きく疫学的手法によって発がん等の確率的影響のリスクを直接明らかに示すことはできない。防護量は、まさにこのような低線量域での人体の防護を検討する際に使用する線量概念である。

#### —参考資料—

- 1) International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation", ICRP Publication 74, Pergamon Press, Oxford, (1997).
- 2) International Commission on Radiological Protection, "Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ )", ICRP Publication 92, Annals of the ICRP, 33(4), Elsevier Science Ltd, Oxford, (2003).
- 3) G. Failla, P. Henshaw, The relative biological effectiveness of X rays and gamma rays, *Radiology*, 17, 1-43 (1931).
- 4) S. T. Cantril, H. M. Parker, The Tolerance Dose, U.S. Atomic Energy Commission MDDC 1100, Technical Information Division, Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tenn., (1945).
- 5) International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Brit. J. Radiol.*, 24, London, 1950, and 1951, *Am. J. Roentgenol.*, 65, 99 (1951).
- 6) International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Brit. J. Radiol.*, Supp., No. 6, London, (1955).
- 7) International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21(1-3), Pergamon Press, Oxford, (1991).
- 8) The 2007 Recommendations of International Commission on Radiological Protection ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, 37(2-4), Pergamon Press, Oxford, (2007).
- 9) United Nations Science Committee on the Effect of Atomic Radiation, Source and Effects of Ionization Radiation, Vol. II Effects, 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes United Nation, New York, (2000).
- 10) 原子力安全委員会事務局, 低線量放射線の健康影響について, 平成23年10月24日改定. (<http://www.nsc.go.jp/info/20110526.html>)

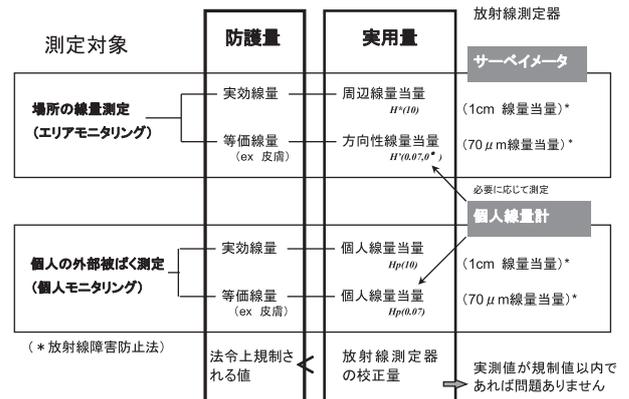
## 実用量と防護量

本稿では、外部被ばくの状態を考慮して、放射線量の測定器の指示値と関連を持つ周辺線量当量および個人線量当量という2つの実用量の定義、ならびに実用量と防護量の関係について解説し、福島第一発電所事故対策で使用されている線量概念についても言及する。

### I. 実用量

実効線量、等価線量などの防護量は、人体の放射線健康リスクと関連を持つ指標であるが、外部被ばくの場合には放射線の入射方向依存性がある量であり、かつ、実際には測定不可能な量であるために放射線モニタリングに直接使用できる量ではない。放射線量の測定値から防護量を適切に推定評価するため、また線量計を校正するときの目標量として使用するために、実用量という概念が、国際放射線単位および測定委員会(International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU)により考案された。実用量は場のモニタリング用(エリアモニタリング)として、周辺線量当量  $H^*(d)$  と方向性線量当量  $H'(d, \Omega)$  がある。前者は、 $\gamma$  線、X線や中性子線など透過性の強い放射線に対する実効線量の管理のために使用され、後者は、軟X線および $\beta$ 線など透過性の弱い放射線による皮膚、末端部(手足など)、眼の水晶体の被ばく管理に使用される。また、個人線量計を人体に装着して行う個人モニタリングには個人線量当量  $H_p(d)$  が用いられる。実用量は、防護量を適切に表す推定値で、かつ測定可能な量であり、防護量を下回らない値を示すように考案されている。防護量(実効線量、等価線量)と実用量(周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量)との対応関係、ならびにモニタリングとの関係を第1図に示す。その後、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)の2007年勧告(ICRP Publication 103<sup>1)</sup>)では、防護量として内部被ばくに係わる預託実効線量と預託等価線量の概念と集団線量の概念である集団実効線量が追加され、預託線量に対応する摂取量推定のための空气中濃度や身体中濃度も実用量に近い概念<sup>a</sup>として考えられるようになった(ICRP Publication 103のB 172項に記載)。

しかし個人モニタリングの場合、個人線量当量  $H_p(d)$  は、放射線が人体後方から入射する場合などでは人体が線量計を遮蔽するため、防護量よりも明らかに小さな値を示すことがわかっている。



第1図 防護量と実用量の対応関係

場のモニタリングの実用量である周辺線量当量  $H^*(d)$  は、ICRU球という仮想的な球ファントム<sup>b</sup>の主軸上の深さ(mm)の位置の線量当量として、(1)式として定義される。

$$H^*(d) = \int Q(L)D(L)dL \quad (1)$$

ただし、 $Q(L)$ は主軸上深さ  $d$  の位置における線質係数、 $D(L)$ は同点における吸収線量をそれぞれ、水中の線エネルギー付与  $L$  (Linear Energy Transfer: LET) の関数として表現したものである。ここで、実用量には放射線加重係数  $w_R$  ではなく、線質係数  $Q(L)$  を使用することが約束事として決められている点に注意すべきである。

実際の放射線は必ずしも同一方向から均一に入射する訳ではないが、周辺線量当量  $H^*(d)$  はすべての放射線がICRU球の主軸に平行に揃って均一に入射する場(拡張整列場)を仮定して、入射方向から主軸上深さ  $d$  (mm) の点の線量当量  $H^*(d)$  を求める。通常の $\gamma$ 線、X線、中性子に対しては  $d = 10$  mm を使用する。そのとき、10 MeV までの $\gamma$ (X)線に対して、 $H^*(10)$  はエネルギーおよび方向性に関する多少の例外を除けば、ほぼ保守的な

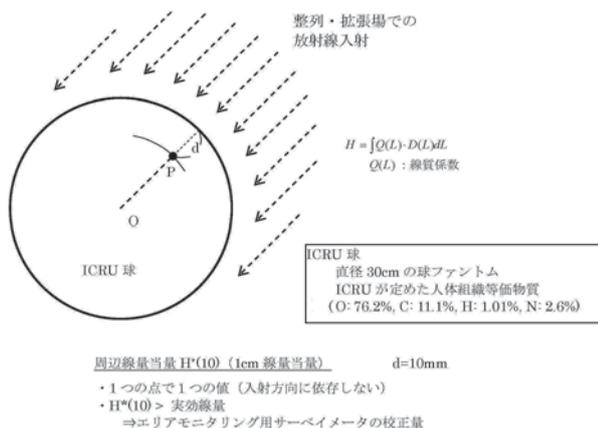
<sup>a</sup> 内部被ばくに関しては、等価線量や実効線量の評価を提供する実用量はまだ定義されていない(ICRP Publication 103の用語解説)。

<sup>b</sup> ICRU球は直径30 cm、密度1 g/cm<sup>3</sup>の人体組織等価物質(成分重量比がO:76.2%, C:11.1%, H:1.01%, N:2.6%)であり、計算に用いられる。

値を示すため、透過性の強い放射線の被ばくに対する実効線量の管理には周辺線量当量  $H^*(10)$  が使用されている。これらの放射線を対象とする測定器は、どの方向から入射する放射線に対しても、理想的には感度が同等であることを目指して設計されている。このように、周辺線量当量は放射線の入射方向に依存しない測定に係わる計測量であるため、場のモニタリング(エリアモニタリング)用の測定器の校正量としても使用される。周辺線量当量の定義に関する概念図を第2図に示す。

一方、皮膚や眼の水晶体は人体の表層部にあり、これらの組織に対する等価線量の測定評価には、別の実用量である方向性線量当量  $H'(d, \Omega)$  が使われる。ここで、 $d$  はICRU主軸上の深さ、 $\Omega$  は入射方向を表す。主に皮膚の線量を対象として  $d=0.07\text{ mm}$  の点を用い、 $H'(0.07, \Omega)$  と表される。この方向性線量当量は、 $\beta$ 線や軟X線などの弱透過性放射線に対して強い方向依存性を示すため、その測定にはむしろ、これに近い方向依存性を持った薄窓型サーベイメータなどが適している。

個人線量計を人体に装着して行う個人モニタリングのための実用量として個人線量当量  $H_p(d)$  がある。 $H_p(d)$  は、人体表面上の指定された点の深さ  $d$  におけるICRU人体等価物質中の線量当量である。指定された点は通常、個人線量計が装着された位置で与えられる。実効線量評価には  $d=10\text{ mm}$  を、皮膚や末端部(手足など)の等価線量の評価には  $d=0.07\text{ mm}$  を使用している。個人モニタリングにおいては、個人線量計を着用する部位が、放射線の入射方向や作業形態に応じて変わる。このことに対応するため、個人線量当量の定義では、周辺線量当量や方向性線量当量のようにICRU球のようなファントムが具体的に指定されていない。しかし、個人線量計を校正するためには、統一された標準的な考え方に基づく基準線量を与える必要があるため、ICRUは国際標準機構(International Organization for Standardization: ISO)で定義<sup>2)</sup>された  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  のスラブ(平板)ファントム(ICRU組織等価物質)を採用した<sup>3)</sup>。実際には個人線量計は、アクリルや水のスラブファントムに



第2図 周辺線量当量に関する概念図

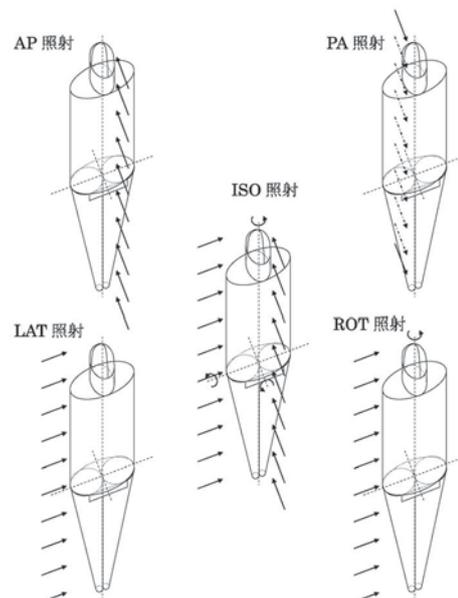
装着して校正するため、角度依存性がある。これを表すために、平行ビームがこのスラブファントムに垂直に入射する場合を  $0^\circ$  とし、入射角度  $\alpha$  を定めた量  $H_{p,slab}$  が使用される。 $H_{p,slab}(d, 0^\circ)$  は、平行ビームがスラブファントムに垂直に入射した場合のファントムの入射面中央から深さ  $d$  の位置の線量当量である。個人線量計を校正する場合、個人線量計をスラブファントムのビーム入射面の表面に装着したとき、応答値が  $H_{p,slab}(d, 0^\circ)$  となるように個人線量計を校正する。 $H_{p,slab}(d, 0^\circ)$  は、自由空間における個人線量計の応答のために定義されているわけではないことに注意する必要がある。

わが国では、以上述べた周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量について、それぞれの深さ位置だけに注目し「1センチメートル線量当量」および「70マイクロメートル線量当量」と呼んでおり、この用語が「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」等の法令にも導入されている。

最近ICRPは、眼の水晶体の線量限度を実効線量と同じ値に下げた<sup>4)</sup>。そのため、例えばIVR(Interventional Radiology)治療法の散乱線などが問題となる医療分野を中心に、眼の水晶体の被ばくモニタリングのため、 $H^*(3)$  および  $H_p(3)$  の実用量の検討が開始されようとしている<sup>5)</sup>。

## II. 周辺線量当量と実効線量の関係

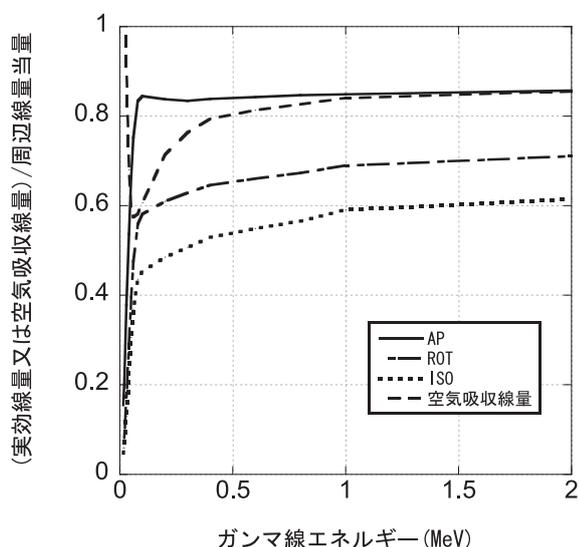
防護量(実効線量、等価線量)は方向依存性を持つ量である。ICRP Publication 74<sup>6)</sup>では人体ファントムへの放射線入射方向として、第3図に示す5種類の代表的な照射条件を示した。APは前方から後方への平行ビーム照射、PAは後方から前方への平行ビーム照射、ISOは等方ビーム照射、LATは横方向からのビーム照射(ただ



第3図 5つの代表的な照射条件

し、左入射と右入射がある）、ROTは横方法(LAT照射)からの平行ビーム照射場でファントムが身体軸で回転している入射条件である。

$\gamma$ 線に関して、実用量である周辺線量当量 $H^*(10)$ とAP, ROT, ISO照射条件の実効線量との比を第4図に示す。この図は、人体の形状を数式で表現した成人用MIRDファントム<sup>7)</sup>に3種類の照射条件(AP, ROT, ISO)のときの実効線量/周辺線量当量 $H^*(10)$ の比を示している。実効線量は、ICRPの1990年勧告(ICRP Publication 60)の組織加重係数に基づいている。参考のため、空気吸収線量/周辺線量当量 $H^*(10)$ の比も記載した。この図からISO条件の場合、Cs-137, Cs-134からの $\gamma$ 線エネルギーに対して実効線量/ $H^*(10)$ の比は0.6程度に収まり、ROT条件の場合でも0.7を大幅に越えることはない。



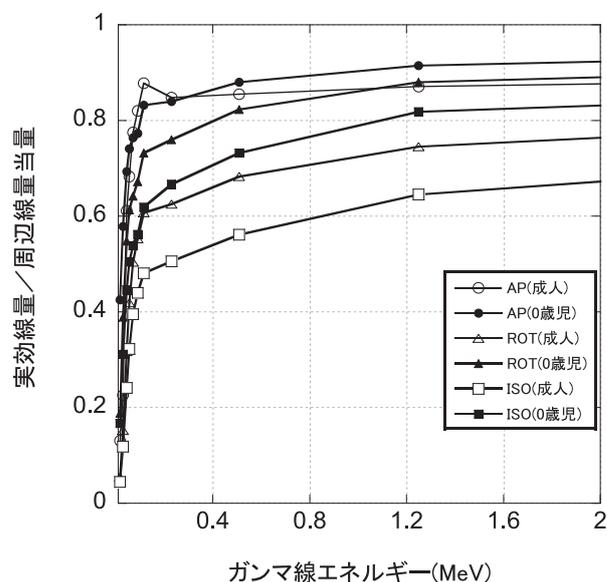
第4図 周辺線量当量 $H^*(10)$ に対する実効線量等の比

新生児(0歳児)の実効線量を含めた実効線量/周辺線量当量の比のグラフを第5図に示す。0歳児は成人よりも大きな値を示すが、比が1.0を越えることはない。

以上のことから、周辺線量当量で校正された測定器を用いて行った放射線場のモニタリングの結果は、実効線量の値よりも大きめの値となることが推測できる。

### Ⅲ. 福島事故対策で使用された線量概念

福島事故対策で用いられた線量概念の実例を第1表に示す。人の受ける線量としては、実効線量、等価線量などの防護量が使用され、空間線量(率)としては実用量である周辺線量当量を使用されていることが想定できる。すなわち、本稿で述べてきた防護量と実用量の両者の概念が、適切に使用されていることがわかる。



第5図 周辺線量等量 $H^*(10)$ に対する実効線量(成人, 0歳児)の比

第1表 福島第一原子力発電所事故対策における線量概念

対策	用いられた線量概念	内容
緊急作業従事者の被ばく線量の限度 (平成23年3月26日放射線審議会答申)	実効線量	従来の緊急時の被ばくの限度100 mSvを250 mSvに上げた。 (平成23年5月に元に戻した)
放射性物質汚染対処特措法 <sup>a)</sup> 基本方針(平成23年11月11日)	(実効線量)*	長期的な目標として追加的に受ける線量が年間1 mSv以下となること
除染関連ガイドライン (平成23年12月, 環境省)	(周辺線量当量)	空間線量率が0.23 $\mu$ Sv/h(屋外に1日8時間滞在するとした場合に年1 mSvの実効線量に相当するとしている)を超える区域を除染実施対象とする。
除染電離則 <sup>b)</sup> , 及び同ガイドライン	実効線量 等価線量 (周辺線量当量)	作業者の限度については、これまでの電離則と同じ。空間線量率2.5 $\mu$ Sv/h(年52週で5 mSv)を超えるか超えないかで管理方法が異なる。

\*括弧内は明記されていないが、使用されている線量概念。

<sup>a)</sup>平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法(環境省, 平成23年8月26日公布, 平成24年1月1日施行)

<sup>b)</sup>東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則(厚生労働省, 平成23年12月12日)

## —参考資料—

- 1) International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publ. 103, Annals of the ICRP, (2007).
- 2) International Organization for Standardization (ISO), X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy, part 1. Radiation characteristics and production methods, ISO 4037-1, Geneva, IEC, (1996).
- 3) International Commission on Radiation Units and Measurements, Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, ICRU Report 47, (1992).
- 4) International Commission on Radiological Protection, ICRP Statement on Tissue Reactions, ICRP ref. 4825-3093-1464, Approved by the Commission on April 21, 2011.
- 5) International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposure, ICRP Publication 116, Annals of the ICRP, 40(2-5), Pergamon Press, Oxford, (2010).
- 6) International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Pergamon Press, Oxford, (1997).
- 7) W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner, H. L. Fisher, Estimation of absorbed fraction for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom, MIRD Pamphlet No.5, (1969).



## From Editors 編集委員会からのお知らせ

—最近の編集委員会の話題より—  
(1月7日第7回編集幹事会)

## 【論文誌関係】

- ・英文誌の出版状況，電子投稿審査システムの開発状況が報告された。3月号入稿済み。Web投稿・審査システムが運用を開始した。
- ・英文誌の50周年記念 Review 論文の進捗状況が報告された。1，3月号に各1報掲載。
- ・50周年記念 Virtual Issue を作成し，その中の論文を無料閲覧とする提案が出版社よりあり，候補30論文を決定した。
- ・和文誌の審査報告書様式の改訂案について検討した。
- ・編集委員会の来年度予算案が報告された。
- ・英文誌インパクトファクター向上策として，各分野の最新の研究動向レポートを順次掲載することとした。名称を募集する。
- ・二重投稿に関しての匿名告発があり，対応を検討した。

## 【学会誌関係】

- ・4月号以降の掲載予定の時論に関する企画案が数件出た。今後とも巻頭言，時論の企画に一層の注力を払うことになった。
- ・現在企画中の誌上座談会の質問内容の確認を行った。この座談会の前に原子力委員会が取りまとめた人材育成に関する見解の解説記事の執筆依頼をすることにした。
- ・2013年春の年会企画セッションから記事執筆の候補を確認・選出した。事前に依頼できるものは，4月号からでも掲載できるよう進めていく。
- ・一昨年の福島第一発電所事故以降，学会誌の解説も含めた主要記事は会誌HPに無料で公開している。約2年経過したので，2013年1月号から，掲載時期は発行後から1か月後とし，掲載記事種別は，以前と同じ巻頭言・時論記事に戻すこととした。
- ・次年度の表紙に掲載する日展の絵画が確定した。絵の制作者から掲載の承諾が得られ，現在装丁を依頼中である。
- ・元編集委員の嶋田昭一郎氏を，編集委員会から学会フェローに推薦した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>

## 福島等で使用されている線量計と防護量の関係

本稿では地表・地中に広く分布した線源による放射線場の特徴と、その放射線場の線量を測定するための線量計(サイベイメータ等)の値および個人の被ばく線量を測定するための個人被ばく線量計の値と防護量との関係について解説する。

### I. 地表・地中に広く分布した線源による光子の放射線場

福島第一発電所の事故により放出された放射性核種は、広い領域に分布し、時間の経過と共に少しずつ地中に浸透している。このような場で使用される線量計について検討する場合には、線源から放出される $\gamma$ 線と共に、土壌や空気により散乱された散乱線の寄与を考慮することが必要である。(線源 $\gamma$ 線と散乱線を総称して、以下では「光子」という。)非常に広い領域からの寄与を求めることになるため、このような場の光子スペクトルを計算することは容易ではないが、放射性核種の分布密度を一様と見なすことができる場合には、面等方線源と単位球検出器を点等方線源と面検出器に置き換える手法<sup>1)</sup>を用いることによりモンテカルロ法で効率よく計算することができる。実際の環境では、土壌中の放射性核種の分布密度にはばらつきがあることが知られているが、広い領域からの寄与を考える場合には、一様と仮定することにより平均的な情報を得ることが可能である。以下では、電磁カスケードモンテカルロ計算コード EGS 5<sup>2)</sup>にこの手法を適用して計算した結果から明らかになった、地表・地中に広く分布した Cs-137 および Cs-134 からの光子による放射線場の特長について述べる。

地表面に一様に分布した Cs-137 による、地表面 100 cm 高さでの光子のスペクトルの計算結果を第 1 図に示す。スペクトルは、Cs-137 から放出され、その後、散乱を受けずに評価点に達する 0.662 MeV の「直接線」と、放出された $\gamma$ 線が土壌や空気中の散乱後に評価点に達する「散乱線」から構成されている。第 1 図のスペクトルは、 $\cos\theta$  の区分をパラメータとして表されている。第 2 図に示すように、 $\cos\theta$  が 1 の時( $\theta=0^\circ$ )は、地表面から垂直に上向きの光子に、 $\cos\theta$  が 0 の時( $\theta=90^\circ$ )は、真横からの光子に、 $\cos\theta$  が -1 の時( $\theta=180^\circ$ )は、上部から真下に向かう光子に対応している。線源である Cs-137 は、水平な地表面に一様に分布していると仮定しているので、 $\theta$  が  $90^\circ$  より大きい角度で直接線が評価点に達することはない。このため、 $\cos\theta$  が負の( $\theta$  が  $90^\circ$  より大き

い)角度区分では、散乱線のみスペクトルとなっている。 $\cos\theta$  が正の( $\theta$  が  $90^\circ$  より小さい)角度区分になると直接線が現れ、その強度は  $0 \leq \cos\theta \leq 0.2$  の領域が一番大きい。

地表面に沈着したセシウムは、時間の経過と共に地中に浸透していく。土壌中鉛直分布を示すパラメータ  $\beta^a$  を  $1 \text{ (g/cm}^2\text{)}$  とした計算結果と表面分布の比較を第 3 図に示す。 $\cos\theta$  が負( $\theta$  が  $90^\circ$  以上)の角度では、土壌中での減衰により空気中に放出される光子が減少したことに伴い、どの区分でも表面に分布した状態よりも減少している。 $\cos\theta$  が正( $\theta$  が  $0^\circ$  以下)の角度では、直接線は土壌による減衰により減少しているが、散乱線は、 $0 \leq \cos\theta \leq 0.2$  の領域以外では増加している。Cs-134 の場合も、線源から放出される $\gamma$ 線エネルギーが異なるのでスペクトル形状は異なるが、全体の傾向は同じである。

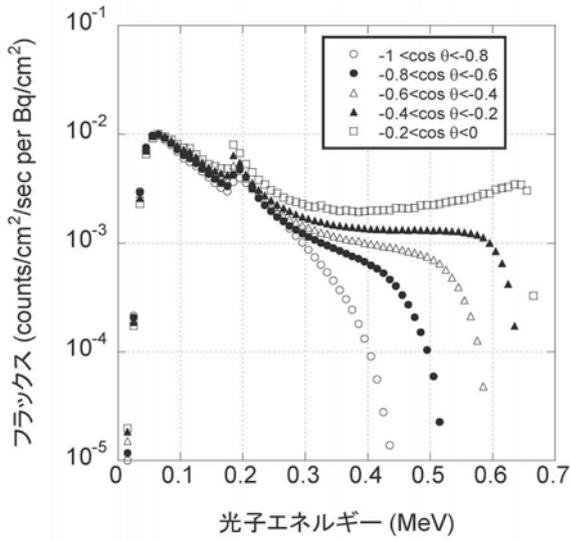
地表に広く分布した Cs-134 および Cs-137 による地表 15 cm および 100 cm での直接線と散乱線の間隔を第 1 表に示す。地表面に分布している場合は、どちらの核種も直接線の方が多いが、 $\beta = 1 \text{ (g/cm}^2\text{)}$  で土壌中に分布している場合は、散乱線が直接線の 1.5 倍となっている。 $\beta = 1 \text{ (g/cm}^2\text{)}$  の場合は、現状での土壌中鉛直分布の平均的な値であることから、線量測定においては、散乱線を考慮しなければならないことが明らかである。

### II. 場の測定に用いられる線量計と防護量

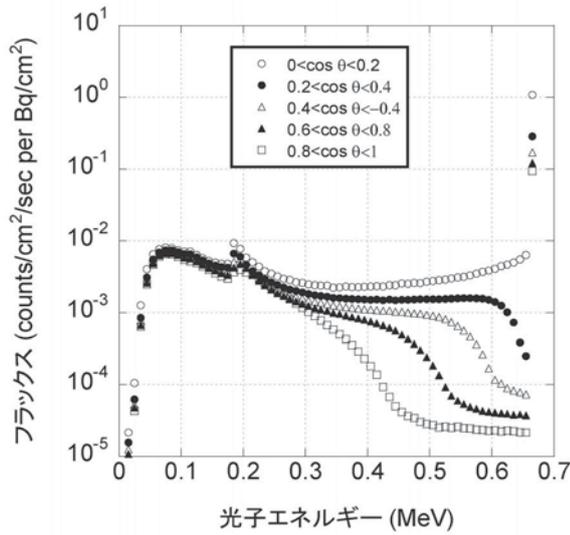
場の線量を測定する線量計(以下では、「サーベイメータ」という)は実用量である周辺線量当量  $H^*(10)$  を測定するように校正されている。前稿で解説されているように、 $H^*(10)$  は、ICRU 球という仮想的な球ファントムの主軸に平行に入射する光子による主軸上の深さ 10 mm の位置の線量当量である。ここでは、CsI シンチレーション検出器を使った小型の高性能サーベイメータを代表例として、周辺線量当量計測について解説する。CsI の大きさは、 $1.9 \text{ cm} \times 1.9 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$  とし、厚さ 1 mm のプラスチックケース内に設置されているとする。フィルタがない場合および厚さ 1 mm のスズ(Sn)のフィルタがある場合を対象とする。このサイズの CsI は、「DX-300

<sup>a</sup>  $\beta$  は、土壌中への浸透が指数関数で表されるとしたときの減弱距離 ( $\text{g/cm}^2$ ) である。

Relation between Dosimeters used at Fukushima etc. and Radiological Protection Quantity

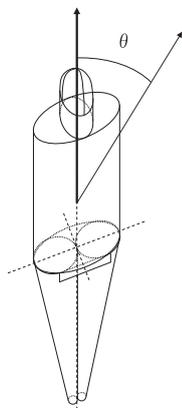


(a)  $\cos\theta < 0$



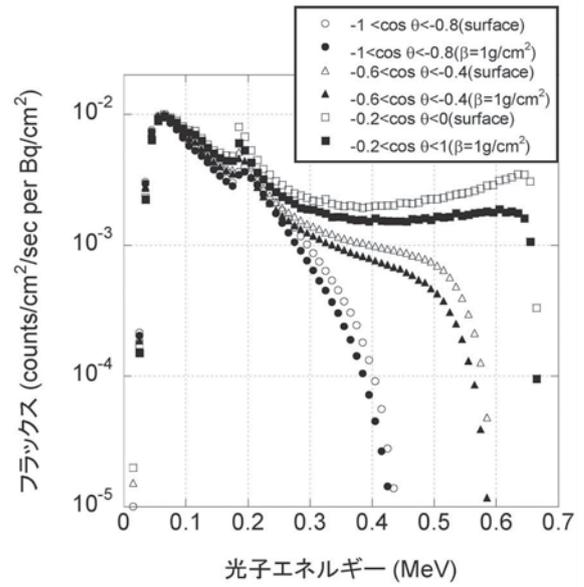
(b)  $\cos\theta > 0$

第1図 地表面に一様に分布したCs-137による、地表面100 cm高さでの光子のスペクトル

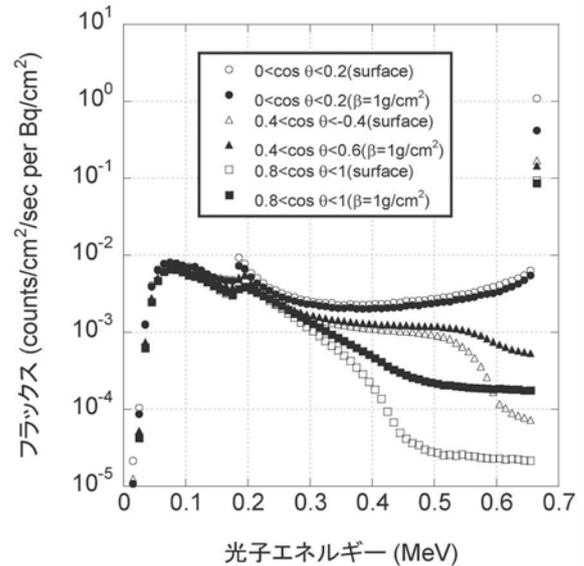


第2図 ファントムと光子の角度θの関係

型のはかるくん」で使用されているものである。第4図に、光子束から周辺線量当量への換算係数を光子エネルギーの関数として示す。光子エネルギーの増大とともに換算係数が増加する関係となっている。第5図に、1.9



(a)  $\cos\theta < 0$



(b)  $\cos\theta > 0$

第3図 地表面での一様分布と  $\beta = 1 \text{ g/cm}^2$  で土壌中鉛直分布をしているCs-137による、地表面100 cm高さでのスペクトルの比較

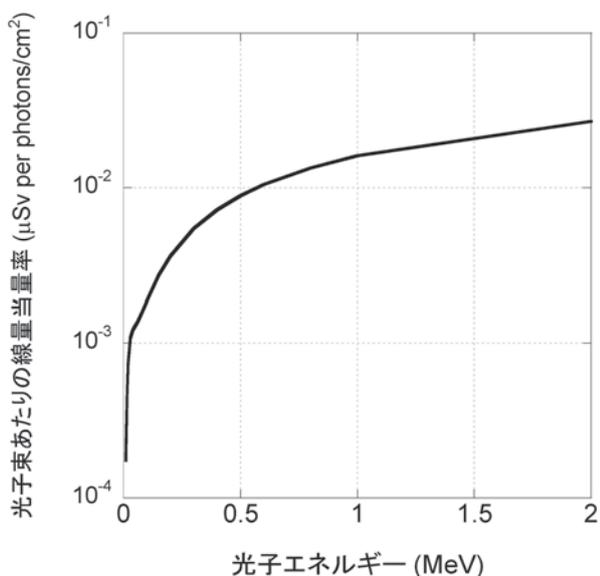
cm×1.9 cm面に1 cm<sup>2</sup>当たり1個の光子が入射した時に、CsI中に0.125 MeV以上のエネルギー付与を生じる計数を光子のエネルギーの関数として示す。0.2 MeVまでは、入射光子エネルギーの減少に伴い計数は増大する傾向となっており、周辺線量当量のエネルギー依存性とは逆の傾向となっている。スズのフィルタにより、低エネルギーの感度増大が抑制されていることもわかる。Cs-137の0.662 MeV  $\gamma$  線を用いて計数値から周辺線量当量への換算係数を決定した場合に対応するサーバイメータの応答の計算値を第6図に示す。第6図には、飯本らによる「DX-300型のはかるくん」の応答の実測値<sup>3)</sup>も併せて示している。スズのフィルタ付きのサーバイメータの応答の計算値は、放射性同位元素を使って測定した応答とよく一致していることが分かる。文献3では、測定値

第1表 地表に広く分布したCs-134およびCs-137による  
直接線と散乱線の光子フラックスの比較  
浸透汚染 ( $\beta=1\text{g/cm}^2$ ) の場合

地表面高さ	Photons/cm <sup>2</sup> /sec per Bq/cm <sup>2</sup>			
	15cm		100cm	
核種	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
直接線(A)	2.86	1.08	2.59	0.980
散乱線(B)	4.02	1.54	4.02	1.54
B/A	1.41	1.43	1.55	1.57

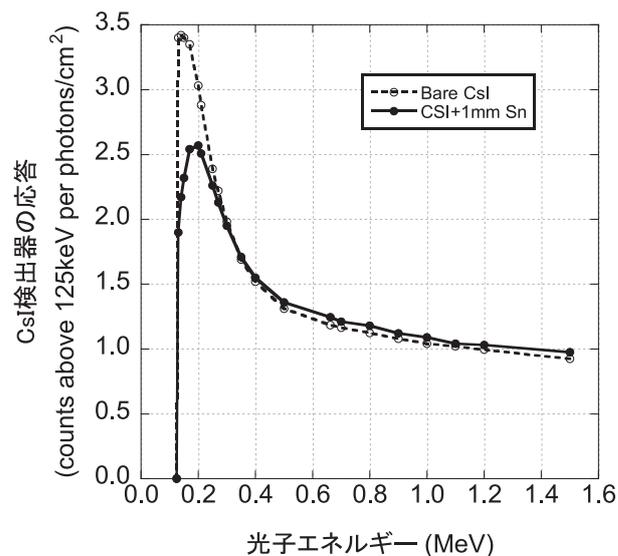
地表汚染の場合

地表面高さ	Photons/cm <sup>2</sup> /sec per Bq/cm <sup>2</sup>			
	15cm		100cm	
核種	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
直接線(A)	6.71	2.55	4.60	1.75
散乱線(B)	4.21	1.61	4.21	1.61
B/A	0.628	0.632	0.914	0.922

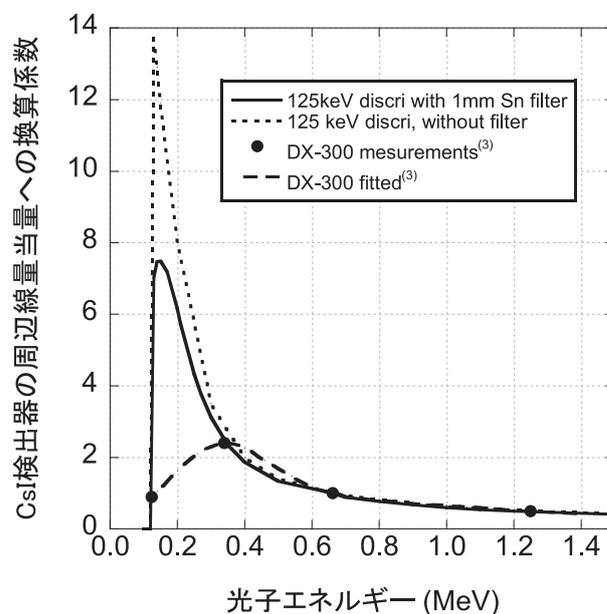


第4図 光子束当たりの周辺線量当量

をスムーズに結ぶ曲線をDX-300のレスポンスであると推定しているが、0.2 MeV 近辺の応答を含めた実測値による評価が必要であると思われる。当然のことながらフィルタの材質や厚さによって応答は異なるが、フィルタを用いることだけで周辺線量当量に一致する応答にすることは容易でないことが分かる。このような応答を持つ線量計の評価のために、第2表に、1章で述べた放射線場で、1.9 cm×1.9 cm の面を地表に向けて置いた場合のサーベイメータの指示値をその場における周辺線量当量の比で示す。放射性核種が地表面に分布している場合は、直接線の比率が高いので、サーベイメータの出力は、フィルタがない場合で1.6倍、1 mm のスズフィルタの場合で1.3倍程度であるが、 $\beta = 1 (\text{g/cm}^2)$  の場合は、散乱線成分の割合が増加するのに伴い、それぞれおよそ1.9倍と1.4倍と過大評価の割合が大きくなっている。



第5図 1.9 cm×1.9 cm×1.5 cm CsI 検出器の検出効率



第6図 1.9 cm×1.9 cm×1.5 cm CsI 検出器の応答

第2表 1.9 cm×1.9 cm×1.5 cm のCsI 検出器の指示値と  
その場における周辺線量当量の比

	Cs-134		Cs-137	
	地表汚染	浸透汚染 ( $\beta=1\text{g/cm}^2$ )	地表汚染	浸透汚染 ( $\beta=1\text{g/cm}^2$ )
フィルターなし	1.56	1.84	1.63	1.92
錫(1mm)フィルター付	1.24	1.4	1.29	1.45

サーベイメータの測定値である周辺線量当量から、実効線量を評価するには、例えば第3表に示されている換算係数を乗ずる。この表に示すように、福島事故の住民被ばくは照射条件としてISOが仮定され、周辺線量当量から実効線量への換算係数として0.6が示されている。第4表に、ROTおよびISO照射形状の実効線量<sup>8)</sup>、ならびに土壌を模擬した体系での照射形状による実効線

第3表 サーバイメータの値(周辺線量当量)から実効線量への換算係数の例

課題	評価者	照射条件	換算係数	備考(線源)
通常的环境放射線被ばく	森内他 <sup>4)</sup>	ISO条件	(0.86) *	宇宙線, Rn, 建材, 地面( <sup>40</sup> K, U, Th系列)
福島事故住民被ばく	放医研 <sup>5)</sup>	ISO条件	0.6	<sup>133</sup> Xe, <sup>129m</sup> Te, <sup>132</sup> Te, <sup>131</sup> I, <sup>132</sup> I, <sup>134</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs
地表汚染	IAEA <sup>6)</sup>	—	0.7**	原子炉事故時の放出核種

\* 周辺線量当量から、実効線量ではなく、ICRP Publication26<sup>7)</sup>に基づく実効線量当量への変換

\*\* IAEA-TECDOC-955<sup>6)</sup>には、実効線量に1.4を乗ずることで、周辺線量当量が求められると記述されている。

量<sup>9)</sup>と、場の周辺線量当量等との比較を示す。両核種とも、実効線量と周辺線量当量との比較では地中への分布状態に依存しており、Cs-137とCs-134が1:1で存在した場合、地表汚染の場合でおおよそ0.6、浸透汚染の場合でおおよそ0.63となっている。

検出器中でのエネルギー付与の情報を得ることができる検出器では、その情報を使って補正(エネルギー補償)を行うことにより、ここで示した例よりも周辺線量当量に近い値を得ることが可能であり、線量マップの測定では、このようなエネルギー補償機能を持つサーバイメータが多く使用されている。しかしながら、エネルギー補償機能を持つサーバイメータでも、エネルギー応答のデータを公開している例は少ない。エネルギー補償を行っていないサーバイメータでは、エネルギー応答の情報はより重要である。周辺線量当量の値付けをしているCs-137に対する応答を正しく表示できないサーバイメータは論外として、サーバイメータを販売する場合には、どのようなエネルギー特性を持っているかということを情報としてマニュアル等に示すことが重要である。

### Ⅲ. 個人被ばく線量計と防護量

前稿で解説されているように、個人線量計は、30 cm×30 cm×15 cmのスラブファントム表面に装着し、平行ビームがスラブファントムに垂直に入射した場合の応答が、 $H_{p,stab}(10, 0^\circ)$ の値になるように校正されている。線源が、人体の前面にのみある場合には、この方法で校正された個人線量計により実用量としての個人線量当量 $H_p(10)$ を測定することができる。しかし、現在の福島の場合のようにあらゆる方向から光子が入射する場合には、個人線量計が人体の陰に隠れる方向があるので、胸部に装着した個人線量計が示す値が $H_p(10)$ を正しく表すかは自明ではない。このような条件下での個人線量計の評価は実測で行うことは容易ではないので、以下のようにEGS5を用いたシミュレーションで検討した結果<sup>8)</sup>を紹介する。

第4表 成人のCristyファントムによる線量の評価

地表高さ100cm、浸透汚染 ( $\beta=1 \text{ g/cm}^2$ )		
周辺線量当量(A) *	0.0206 $\pm$ 0.000011	(A)に対する比
実効線量(ROT照射) *	0.0135 $\pm$ 7.5E-06	0.655
実効線量(ISO照射) *	0.0112 $\pm$ 6.3E-06	0.544
周辺線量当量(土壤中線源による照射)(B) **	0.0209 $\pm$ 0.000026	(B)に対する比
実効線量(土壤中線源による照射) **	0.0123 $\pm$ 0.00048	0.590

地表高さ100cm、地表汚染		
周辺線量当量(A) *	0.0313 $\pm$ 0.00001	(A)に対する比
実効線量(ROT照射) *	0.0207 $\pm$ 0.000013	0.661
実効線量(ISO照射) *	0.0173 $\pm$ 0.000011	0.553
周辺線量当量(地表線源による照射)(B) **	0.0311 $\pm$ 0.000085	(B)に対する比
実効線量(地表線源による照射) **	0.0194 $\pm$ 0.00185	0.625

Cs-134 1Bq/cm<sup>2</sup>,  $\mu\text{Sv/h}$

地表高さ100cm、浸透汚染 ( $\beta=1 \text{ g/cm}^2$ )		
周辺線量当量(A) *	0.0558 $\pm$ 0.000033	(A)に対する比
実効線量(ROT照射) *	0.0369 $\pm$ 0.000022	0.661
実効線量(ISO照射) *	0.0308 $\pm$ 0.000019	0.553
周辺線量当量(土壤中線源による照射)(B) **	0.0541 $\pm$ 0.000053	(B)に対する比
実効線量(土壤中線源による照射) **	0.0321 $\pm$ 0.00187	0.592

地表高さ100cm、地表汚染		
周辺線量当量(A) *	0.0857 $\pm$ 0.000057	(A)に対する比
実効線量(ROT照射) *	0.0569 $\pm$ 0.000039	0.664
実効線量(ISO照射) *	0.0478 $\pm$ 0.000033	0.558
周辺線量当量(地表線源による照射)(B) **	0.0808 $\pm$ 0.000238	(B)に対する比
実効線量(地表線源による照射) **	0.0518 $\pm$ 0.00370	0.642

Cs-134+Cs-137(1:1) 1Bq/cm<sup>2</sup>,  $\mu\text{Sv/h}$

地表高さ100cm、浸透汚染 ( $\beta=1 \text{ g/cm}^2$ )		
周辺線量当量(土壤中線源による照射)(B) **	0.0375 $\pm$ 0.000029	(B)に対する比
実効線量(土壤中線源による照射) **	0.0222 $\pm$ 0.000966	0.603

地表高さ100cm、地表汚染		
周辺線量当量(地表線源による照射)(B) **	0.0559 $\pm$ 0.000126	(B)に対する比
実効線量(地表線源による照射) **	0.0356 $\pm$ 0.00207	0.628

\* 周辺線量当量(A)、実効線量(ROT照射)、実効線量(ISO照射)は文献8の評価値。

\*\* 周辺線量当量(B)、実効線量(土壤中線源による照射)、実効線量(地表線源による照射)は文献9による評価値。

人体を模擬したファントムの前面における人体等価物質の吸収線量を理想的なエネルギー・角度特性を持つ個人線量計の値とする。使用したファントムは、Cristyファントム<sup>10)</sup>の胴体(頭と足部を除いたもので楕円柱形状)部分の形状を持つ人体等価物質の一樣ファントムである。

第5表 成人のCristyファントムによる線量計の評価  
地表高さ100cm, 浸透汚染 ( $\beta=1 \text{ g/cm}^2$ )

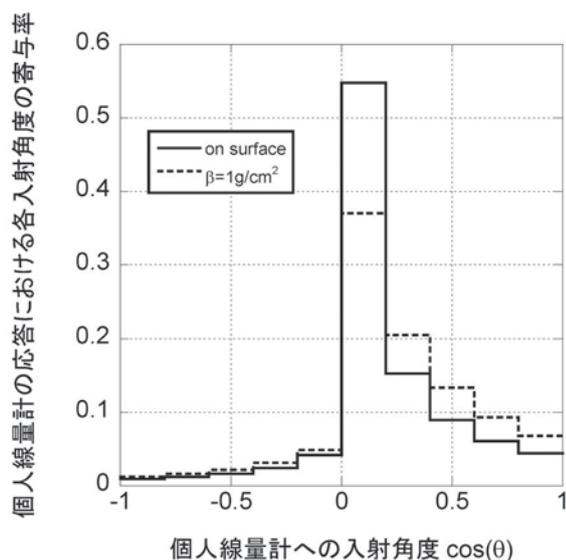
	Cs-137 $1\text{Bq/cm}^2$ $\mu\text{Sv/h}$			Cs-134 $1\text{Bq/cm}^2$ $\mu\text{Sv/h}$		
周辺線量当量(A)	0.0206	$\pm$ 0.000011	(A)に対する比	0.0558	$\pm$ 0.000033	(A)に対する比
実効線量(ROT照射)	0.0135	$\pm$ 7.5E-06	0.655	0.0369	$\pm$ 0.000022	0.661
実効線量(ISO照射)	0.0112	$\pm$ 6.3E-06	0.544	0.0308	$\pm$ 0.000019	0.553
成人Cristyファントム装着個人線量計	0.0142	$\pm$ 0.00022	0.689	0.0385	$\pm$ 0.00061	0.690

地表高さ100cm, 地表汚染

	Cs-137 $1\text{Bq/cm}^2$ $\mu\text{Sv/h}$			Cs-134 $1\text{Bq/cm}^2$ $\mu\text{Sv/h}$		
周辺線量当量(A)	0.0313	$\pm$ 0.00001	(A)に対する比	0.0857	$\pm$ 0.000057	(A)に対する比
実効線量(ROT照射)	0.0207	$\pm$ 0.000013	0.661	0.0569	$\pm$ 0.000039	0.664
実効線量(ISO照射)	0.0173	$\pm$ 0.000011	0.553	0.0478	$\pm$ 0.000033	0.558
成人Cristyファントム装着個人線量計	0.0214	$\pm$ 0.00032	0.684	0.0595	$\pm$ 0.00087	0.694

第5表に、I章で述べた放射線場における成人ファントムに対する個人線量計の値と場の周辺線量当量等との比較<sup>9)</sup>を示す。表には、ROTおよびISO照射形状の実効線量(第4表中の値の再掲)を併せて示す。両核種とも、地中への分布状態によらず、個人線量計の値は、ROTおよびISO照射形状の実効線量より若干大きくなっている。周辺線量当量との比較では、おおよそ0.69となっている。第7図に、地表汚染ならびに $\beta=1 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ の地中鉛直分布を持つ浸透汚染のCs-134の場合の各角度区分の寄与率を示す。 $0 \leq \cos\theta \leq 0.2$  ( $\theta$ が $78.5^\circ$ から $90^\circ$ )の角度区分の光子の寄与が中心であり、ROT照射形状に近い場であることが分かる。

子どもの場合には、体格が小さいので身体による光子



第7図 地表汚染, ならびに $\beta=1 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ で広く分布した浸透汚染のCs-134による成人ファントムの個人線量計に対する各角度区分の光子の寄与率(地表面100cm高さ位置での光子スペクトルを使用)

の減衰が少ないため個人線量計の値が大きくなる。第6表に $\beta=1 \text{ (g/cm}^2\text{)}$ の地中鉛直分布を持つCs-134およびCs-137による1歳, 5歳, 10歳および15歳児のCristyファントムの胴体を用いて計算した結果を示す。1歳および5歳の場合は、地表15cm位置の、10歳および15歳の場合は、地表50cm位置の光子スペクトルによる結果である。表中のROTおよびISO照射形状の実効線量は、山口が公表している年齢依存の換算係数<sup>11)</sup>を用いた当該年齢に対応したものである。どの場合も個人線量計の値は、ROT照射形状の実効線量にほぼ近い値になっている。

個人線量計は本来、実用量を測定することを目的としたものであるが、上記で述べたように地表および地中に広く分布した線源中で着用した場合には、数値的には実効線量に相当する線量を結果的に測定していると言える。

ここで紹介した結果は飽くまで理想的なエネルギー・角度特性を持つ個人線量計を想定したものである。実際に使用されている個人線量計については、それぞれのエネルギー・角度特性に基づいて検討が必要である。

—参考資料—

- 1) Y.Namito, H.Nakamura, A.Toyoda, K.Iijima, H.Iwase, S. Ban, H.Hirayama, "Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo radiation transport calculation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 49(2012) 167-172.
- 2) H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman, W.R. Nelson, "The EGS5 Code System", SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- 3) 飯本武志, 須藤幸雄, 中村美和, 草間経二, "教育用簡易放射線測定器"はかるくん"のエネルギー特性", *Isotope News* 689(2011) 17-21.

第6表  $\beta = 1$  (g/cm<sup>2</sup>)の地中鉛直分布を持つCs-134及びCs-137による地中浸透汚染における  
Cristy ファントム(1歳, 5歳, 10歳及び15歳児)に装着した線量計の評価

	浸透汚染 ( $\beta=1$ g/cm <sup>2</sup> )				
	Cs-134 1Bq/cm <sup>2</sup> , $\mu$ Sv/h			Cs-137 1Bq/cm <sup>2</sup> , $\mu$ Sv/h	
1歳児	地表15cm高さ			地表15cm高さ	
周辺線量当量(A)	0.0596	$\mp$ 3.9E-05	(A)に対する比	0.0219	$\mp$ 1.4E-05 (A)に対する比
実効線量(ROT照射)	0.0470	$\mp$ 3.2E-05	0.789	0.0171	$\mp$ 1.1E-05 0.781
実効線量(ISO照射)	0.0410	$\mp$ 2.8E-05	0.688	0.0149	$\mp$ 8.1E-06 0.680
1歳児Cristyファントム装着 個人線量計	0.0468	$\mp$ 0.00030	0.785	0.0171	$\mp$ 0.00011 0.781
5歳児	地表15cm高さ			地表15cm高さ	
周辺線量当量(A)	0.0596	$\mp$ 3.9E-05	(A)に対する比	0.0218	$\mp$ 1.4E-05 (A)に対する比
実効線量(ROT照射)	0.0453	$\mp$ 4.1E-05	0.760	0.0165	$\mp$ 1.1E-05 0.756
実効線量(ISO照射)	0.0390	$\mp$ 2.7E-05	0.655	0.0142	$\mp$ 9.1E-06 0.651
5歳児Cristyファントム装着 個人線量計	0.0440	$\mp$ 0.00039	0.739	0.0165	$\mp$ 0.00014 0.756
10歳児	地表50cm高さ			地表50cm高さ	
周辺線量当量(A)	0.0577	$\mp$ 3.3E-05	(A)に対する比	0.0212	$\mp$ 1.2E-05 (A)に対する比
実効線量(ROT照射)	0.0419	$\mp$ 2.2E-05	0.726	0.0153	$\mp$ 9.1E-06 0.723
実効線量(ISO照射)	0.0360	$\mp$ 2.2E-05	0.624	0.0131	$\mp$ 7.4E-06 0.619
10歳児Cristyファントム装着 個人線量計	0.0424	$\mp$ 0.00047	0.735	0.0153	$\mp$ 0.00016 0.723
15歳児	地表50cm高さ			地表50cm高さ	
周辺線量当量(A)	0.0577	$\mp$ 3.3E-05	(A)に対する比	0.0212	$\mp$ 1.2E-05 (A)に対する比
実効線量(ROT照射)	0.0402	$\mp$ 2.4E-05	0.697	0.0147	$\mp$ 8.8E-06 0.695
実効線量(ISO照射)	0.0338	$\mp$ 0.00002	0.586	0.0123	$\mp$ 7.4E-06 0.581
15歳児Cristyファントム装着 個人戦良計	0.0402	$\mp$ 0.00056	0.697	0.0148	$\mp$ 0.00020 0.700

- 4) 森内茂, 他, 保健物理, 125(1990)121-128.
- 5) 放射線医学総合研究所, 外部被ばく線量の推計について, 平成23年12月23日.  
([http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/231213\\_senryosuikei.pdf](http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/231213_senryosuikei.pdf))
- 6) General Assessment Procedures for Determining Protective Actions during a Reactor Accident IAEA, Vienna, IAEA-TECDOC-955, (1997).
- 7) International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the ICRP, Publication 26, Annals of the ICRP 1, No. 3, Pergamon Press, New York, (1977).
- 8) 平山英夫, 高木俊治, “ファントムに装着した個人被ばく線量計の評価”, RADIOISOTOPES 投稿中.
- 9) 高木俊治, 岩井敏, 平山英夫, “環境汚染状況における被ばく線量の評価”, RADIOISOTOPES 投稿中.
- 10) M.Cristy, K. F. Eckerman, “Specific Absorbed Fraction of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources, I. Methods”, ORNL/TM-8281/V, (1987).
- 11) Y. Yamaguchi, “Age-dependent Effective Doses for External Photons”, *Radiat. Prot. Dosim.*, 55(1994)123-129.

#### 著者紹介

放射線工学部会 線量概念検討ワーキンググループ

平山英夫(ひらやま・ひでお)(主査)

高エネルギー加速器研究機構

(専門分野/関心分野)放射線遮蔽, 放射線挙動  
中島 宏(なかしま・ひろし)(幹事)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)放射線遮蔽, 放射線計測, 放射線防護  
佐波俊哉(さなみ・としや)(幹事)

高エネルギー加速器研究機構

(専門分野/関心分野)放射線工学, 核データ  
山口恭弘(やまぐち・やすひろ)

日本原子力研究開発機構

(専門分野/関心分野)線量評価, 放射線管理  
佐藤 理(さとう・おさむ)

三菱総合研究所

(専門分野/関心分野)放射線遮蔽, 放射線挙動, 放射線防護  
高木俊治(たかぎ・しゅんじ)

三菱総合研究所

(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線防護  
鈴木敏和(すずき・としかず)(オブザーバー)

放射線医学総合研究所

(専門分野/関心分野)放射線計測, 線量評価  
岩井 敏(いわい・さとし)

原子力安全推進協会(旧日本原子力技術協会)

(専門分野/関心分野)放射線防護, リスク, 放射線計測

## 解説

# 最近の世界のエネルギー確保の動き・経済ダイナミズムと関連技術

## 日本のエネルギーの今後と産業復興

東京大学 生産技術研究所 金子 祥三

2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原子力事故を経験して、日本のエネルギーのあり方が大きく変わろうとしている。原子力の安全性確保についての地道な取組みが求められる一方、電力供給の安定性、化石燃料の確保、再生可能エネルギー導入への課題、またエネルギーベストミックスのあり方などが問われている。このような状況の中で、環境・経済・安全が確保できる共存解を求めて、どうすれば持続可能な経済成長が可能なのかについて解説する。

### I. はじめに

2009年の自民党政権時代に2020年までに温室効果ガスを15%削減(2005年基準)すると発表された。民主党へ政権交代した後、明確な説明もないまま25%削減(1990年基準)案が忽然と出された。これは、2005年基準で表せば30%削減であり、自民党案の倍の数値である。もともと自民党案の温室効果ガス削減案を受け、エネルギー政策において原子力比率を増加させていく計画であった。民主党案における削減案の根拠は示されていないが、いずれにしても原子力比率は大幅に増加させていかなければ、僅か10年で30%もCO<sub>2</sub>を削減するなど不可能であり、このような背景から2030年迄に原子力を50%以上とするエネルギー基本計画が2010年に出された。しかし、東日本大震災、福島第一原発の事故を契機に新設どころか原子力発電所の再稼働ですら難しい状況となっている。

本稿では今後のエネルギー政策がはっきりと見えない中で環境・経済・安全の共存解を実現するための日本のエネルギーの今後と産業復興について説明する。

### II. 今後のエネルギーの動向

2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故により、原子力比率について①0%、②15%、③20~25%の3案で検討がなされ、日本のエネルギー情勢は大きく変わろうとしている。2010年のエネルギー基本計画では、2030年に原子力比率50%とする計画であった。今後、原子力比率を下げることになれば、この減少分を火力と再生可能エネルギーでカバーしなければなら

ない。つまり、3案のうち、いずれの案でも火力発電の比率が増えることになる。原子力の比率低下と火力の増加が直接的に与える影響は、燃料費の急増に伴う発電コストの上昇である。さらにはCO<sub>2</sub>の発生量増加により地球温暖化対策の逆行が懸念される。

さらに、電力料金の大幅な値上げとなれば、国際競争力が損なわれ、製造業の海外移転による国内の雇用喪失・貿易収支の赤字・税収減の3重苦となり“負のスパイラル”に陥る危険がある。この原子力の稼働停止による輸入燃料費の大幅増加は、いま日本が直面する最大かつ最も深刻な経済的課題といえる。

### III. 火力発電の増加と燃料費の急増

日本のエネルギー自給率はわずか4%であり、先進国の中で最低の値である。そのため、燃料を輸入するための外貨を稼ぐ必要がある。1989年頃から2002年までは電力消費量が40%増えていたにもかかわらず、日本の輸入燃料費はほぼ横ばいであった。これは、エネルギーベストミックスの方針のもと、原子力の比率増加と石炭火力増加により燃料費の増加が抑えられてきたことによる。今回、原子力が停止し、さらには天然ガス価格の高騰もあり一挙に輸入燃料費が増加し、たちまち国際収支も赤字に転落した。(第1図)

火力や原子力の発電原価は、固定費(設備費)、変動費(燃料費、人件費、保守費)、その他で構成され、この合計値は原子力、石炭、天然ガスともにほぼ同レベルである。原子力の場合、設備費は高いが燃料費は安い。逆に天然ガス火力は、設備費は安く、燃料費が高くなっている。固定費は一旦建設してしまうと手がつけられない(社債発行、銀行からの借入金等は毎年きちんと支払わなければならない)。一方、変動費は毎年変化する。したがって電力会社の年度予算では燃料費が30~40%を占めてい

*Japanese Energy Policy and Revival of Japanese Economy and Industries*: Shozo KANEKO.

(2012年 12月15日 受理)



第1図 2011年の貿易収支

る。そのため、原子力から天然ガス火力に切り替えた途端に年度予算は数千億円の大赤字に転落することが起こりうる。しかも、必死に天然ガスを買集める必要のある日本は、米国や欧州よりもはるかに高い値段で天然ガスを購入しているのが現状である。

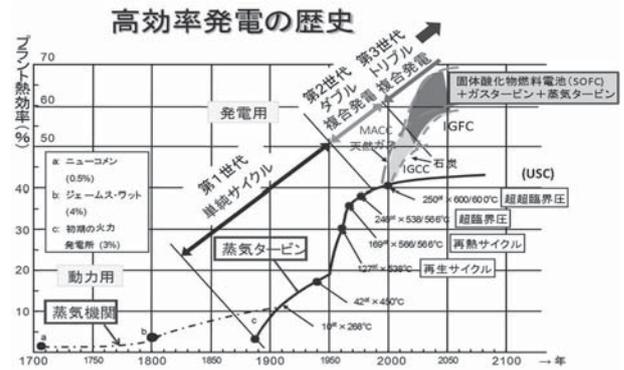
2012年3月期において原発を抱える電力会社は、燃料費急増に伴う赤字で財務状況は急速に悪化している。特に、原子力比率が50%を超えていた関西電力、九州電力、四国電力ほど影響が大きく、電力料金の値上げは必至である。原子力の稼働停止がこのまま続けば、輸入燃料費は年間約3兆円増加し、世帯当り年間6万円の電力料金の値上げにつながる。つまり、原子力の再稼働と電力料金値上げは直結した問題であり、年間3兆円分の新たな電力料金収入がなければ、電力会社は十分な燃料を確保できないことになる。

連日、原子力の再稼働反対デモが行われているが、“再稼働反対”ということは“電力料金値上げ賛成”と同義語であることをどれだけの人を理解しているであろうか。しっかりした安全基準を確立し、合格した原子力を1日も早く運転再開することが肝要であり、再稼働が遅れば遅れるほど日本経済が疲弊する。原発停止による火力発電の急増(燃料費増加)に対する対策としては、火力発電所の効率向上が唯一の解決策である。火力発電の効率向上により、燃料消費量削減による燃料費用増加防止、CO<sub>2</sub>発生量削減が見込め、地球温暖化対策としても有効である。

#### IV. 高効率発電技術の歴史と今後

熱効率の歴史はニューコメンの蒸気機関の効率0.5%から始まり、ジェームス・ワットの往復動蒸気機関では効率4%に改善された。1900年以降、蒸気タービンの蒸気圧力・蒸気温度を上昇させることで効率は時代と共に向上してきている。

この発電技術は、①第1世代(ボイラ-蒸気タービン)、②第2世代(ガスタービン-蒸気タービン)、③第3世代(燃料電池-ガスタービン-蒸気タービン)に分類できる(第2図)。これらの発電技術について世代ごとに



第2図 火力発電の効率向上の歴史

説明する。

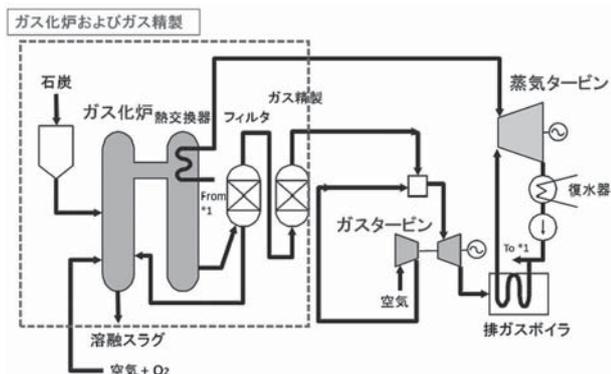
##### 1. 第1世代の発電技術

第1世代である従来の石炭火力は、石炭を微粉炭機で粉砕しボイラで燃焼させ、その熱で蒸気を発生し、蒸気タービンを回して発電する、いわゆる蒸気タービンの時代である。1880年代にパーソンズによって開発された軸流多段蒸気タービンは、高効率性、高信頼性、高経済性により、それまで多用されていたワット以来の往復動機関を駆逐し、たちまち火力発電の中心となった。その後、蒸気タービンは、1900年代初頭から、約100年にわたり火力発電を支えてきた。高効率化のため蒸気温度・蒸気圧力の高温・高圧化やサイクルの工夫により、現在では熱効率が40%を超えている。しかし、蒸気温度が600℃を超え、材料の制約からほぼ技術的には限界にきている。さらなる効率化には、これ以上に蒸気温度を上げるため新材料の開発が必要となる。新材料開発には10万時間のクリープ強度試験等の長期間を要するため、現実的には厳しい。また、仮に温度上昇が実現できたとしても効率上昇幅は小さく、飽和に近づくため“労多くして功少ない”状態となる。

##### 2. 第2世代の発電技術

第2世代の発電技術は、ガス燃料または軽油を燃焼させガスタービンを回し、さらにその排熱で蒸気を発生させ蒸気タービンを回して発電するのでダブル複合発電と呼ばれる。日本のガスタービン技術は後発であったが、1984年頃世界に先駆けて100万kW級の天然ガス燃焼大容量複合発電を商用化した。さらに、世界で初めて1,600℃級のガスタービンを実用化し、世界をリードしつつある。

固体である石炭を使ったダブル複合発電がIGCCである。IGCCとはIntegrated coal Gasification Combined Cycleの略で、「石炭ガス化複合発電」と称される(第3図)。IGCCでは、石炭ガス化炉で石炭を高温でガス燃料に変換し、不純物を取り除いた後、ガスタービンで燃焼させダブル複合発電を行う。IGCCの技術は1990年代



第3図 石炭ガス化複合発電

に欧米が先行して開発が進み、米国に2基、欧州に2基合計4基の30万kW級のプラントが運転を開始した。しかし、これらのIGCCに使用されている石炭ガス化炉は、1980年代に開発された化学プラント用の技術をそのまま転用したため、効率が低い上に信頼性が低く、トラブル続発であった。そのため、商用機建設はまだまだ遅々として進んでいない。

一方、日本では純国産技術による開発を、パイロットプラント、実証プラントという着実なステップで進め、途中で幾多の困難を克服し、現在では完全に欧米を凌駕して世界トップである。また、従来の石炭火力より20%ほど効率が良く窒素酸化物NO<sub>x</sub>、硫黄酸化物SO<sub>2</sub>、煤塵なども天然ガス並みのクリーンさである。2008年に運転を開始した福島県勿来にある25万kWのIGCC実証プラントは環境面、性能面ともに高い評価を受け、後は1日も早く商用機の建設が待たれる状態となっている。

商用機建設の課題は、第1号機はすべてが新設計のため、どうしても設備費が2割程度高くなってしまっていることである。

このような新技術を商用化するときのコストの壁はあらゆる機種に共通したものであり、米国では「死の山(Mountain of Death)」と呼ばれ、同種のプラントを5つ建設すると平準化されて、市場で十分競争力のあるものになるといわれている。したがって、最初の5つ目のプラントまでは、国が積極的に支援策を講じて以後、自立できるような手が打たれている。日本においても、IGCC商用機建設を促進し産業復興に貢献する国の積極的な支援策が求められる。

また、IGCCの特徴として従来の微粉炭焼き石炭火力と比べ、ダブル複合発電による高効率化とCO<sub>2</sub>発生量減少に加えて低品位炭の有効利用が挙げられる。石炭は無煙炭や瀝青炭といった高品位炭と、亜瀝青炭や褐炭といった低品位炭に分類される。褐炭、亜瀝青炭といった低品位炭は、豪州、インドネシア、米国、欧州、中国などに多く存在している。量的には、世界中に埋蔵されている石炭の約半分が低品位炭といわれる。安価で安定した化石燃料を確保するため、現在この低品位炭の利用も注目

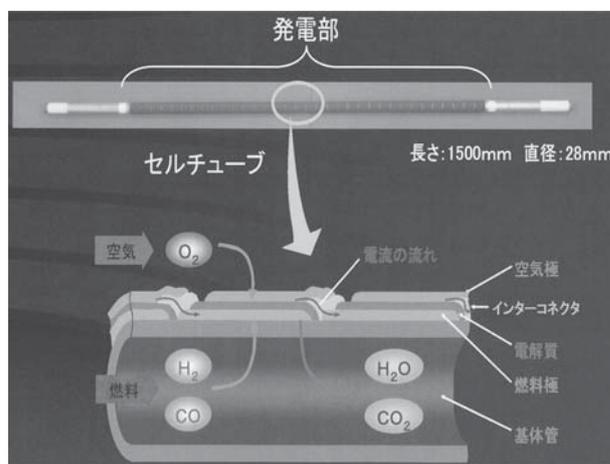
を集めている。低品位炭は灰の融点が高いケースが多く、従来の石炭焼き発電プラントでは、火炉壁のスラッシングの問題で部分的にしか使えていない。しかし、IGCCでは、ガス化炉で高温で灰分を溶解して排出するため、灰の融点の低い石炭ほど有利に働き、これまで発電には使用困難であった石炭も利用できる。特に、埋蔵量が膨大な米国PRB炭、中国神華炭はともに灰の融点が高くIGCC向きであり、IGCCはエネルギー源の確保と有効利用の点からも極めて将来性に富んだ技術である。

### 3. 第3世代の発電技術

このような高効率のダブル複合発電に燃料電池(特に高温で作動する固体酸化物型燃料電池SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)をトッピングし、さらなる高効率化を図るものが第3世代の発電技術であるトリプル複合発電である。まず、SOFCにより発電を行い、その1,000℃の廃熱でガスタービンを回し、その後の600℃の廃熱で蒸気タービンを回す。このような3重の発電により燃料の持つエネルギーを最大限電力に変換できる訳である。

ここで、まずSOFCについて説明する。トリプル複合発電の中核技術であるSOFCは、円筒型のセルスタック構造をしている。セラミックス製の構造部材である基体の表面に燃料極・電解質・空気極の順に積層して構成する。空気中の酸素は、電子をもらって酸素イオンとなり、電解質内を移動する。水素や一酸化炭素を含む燃料ガスは基体の内部を流れ、基体と燃料極内を拡散しながら燃料極と電解質との界面に到達する。そこで電解質内を移動してきた酸素イオンと反応し電子を放出して、水蒸気や二酸化炭素となる。発生した水蒸気や二酸化炭素は燃料極内を拡散して主流の燃料ガスの流れに混合される。放出された電子は外部電気回路(負荷)を移動することで、電流が発生し発電を行う。(第4図)

従来、燃料電池といえば燃料電池自動車などに使われる固体高分子型PEFC(Polymer Electrolyte Fuel Cell)



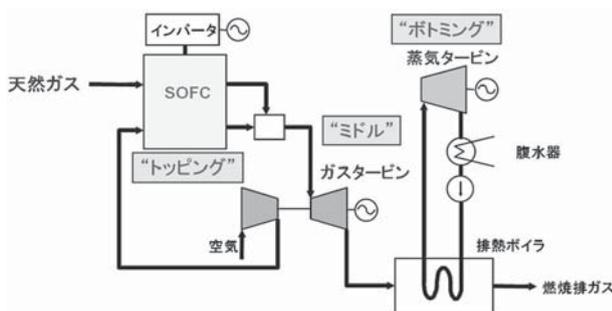
第4図 SOFCの原理

が話題となっていた。これは約80℃の低温で作動し、数々の優れた特徴を有するが、①水素イオン(H<sup>+</sup>)のみが有効成分、②触媒として白金(Pt)が必要、③低温のため複合発電サイクルが組めない等の欠点がある。更に水素は自然界に資源として存在せず、経済的・商業的に成り立つためには“水素”をどう確保するかという大きな課題がある。この点、SOFCは、酸素イオン(O<sup>2-</sup>)が移動するため基本的には“燃えるものなら何でも使える”という大きなメリットがある。したがってSOFCの特徴をまとめると、①酸素イオン(O<sup>2-</sup>)の移動で発電するため使用燃料の炭素(C)、水素(H)が最大限に利用できる、②1,000℃で作動するため触媒が不要、③1,000℃で作動するため複合発電サイクルが組めることなどである。

トリプル複合発電では天然ガスを使用した場合、発電効率は65%(高位発熱量基準、送電端)となり、天然ガスの使用量とCO<sub>2</sub>発生量を現状の最高効率のガスタービン複合発電システムから、更に20%低減できる(第5図)。石炭ガスを使用する場合は、ガス化時に損失が発生するため、熱効率は同基準で55%(IGFC: Integrated coal Gasification Fuel Cell)になるが、石炭の使用はエネルギーセキュリティ上、大きなメリットである(第6図)。また、2012年から国家プロジェクトも始まり、この分野においても日本が世界をリードしている。

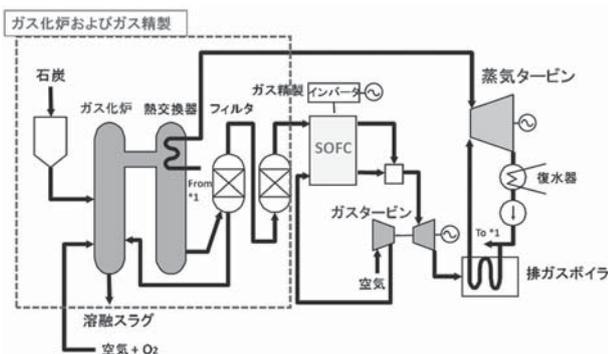
## V. 産業の復興を図るための課題と打ち手

これまで述べたように、輸入燃料費の急増は国際貿易収支の悪化、電力料金の値上げにつながり、国内産業、



第5図 トリプル複合発電(LNG)

(出典：Thermal & Nuclear Power, Vol.52, No.10, 2001, p.129)



第6図 トリプル複合発電(石炭:IGFC)

特に製造業に致命的な影響を与える危険性がある。では、3.11後にいち早く原発の停止を決定したドイツの現状について次に述べる。

### 1. ドイツの現状

3.11後、メルケル首相により1980年以前に運転開始した8基の原発について即時停止が発表された。そして、2022年までに残りの9基の原発を停止することになった。日本とは異なり、原発すべてが停止したわけではなく、9基は今もなお発電を続けている。ここで、ドイツの意思決定のプロセスの詳細を見てみると、福島第一原発事故後のメルケル首相は2つの委員会を立ち上げている。一つが日本でもよく報道されている“安全なエネルギー供給に関する倫理委員会”で聖職者や哲学者を含む人々で構成されている。もう一つは“原子炉安全委員会(RSK)”でドイツの原発の運転の技術的可否を審査している。この両委員会の結論は、それぞれ“ドイツは2020年までに原発をすべて廃止すべきである”と“ドイツの原発は安全であり運転して差支えない”というものであった。

これを受けてメルケル首相は、2011年6月9日にエネルギーに対する施政方針演説を行った。この演説では、原発についてのみではなく、原発停止による電力供給不足をなくすために2020年までに少なくとも1,000万kWの火力発電所を建設すること、再生可能エネルギーを2020年までに35%に増加するが、国内の製造業を維持するため負担増加額は3.5 cent/kWh以下にすること、変動電力の増加に伴う不安定化防止のため800 kmの送電網を建設すること、2020年までに電力消費を10%削減といったことを合わせて述べている。日本では原発停止が大きく報道されているが、それに伴う対策が必要であることをしっかりと伝えている。

しかし、メルケル首相の訴えにもかかわらず、これらの必要な対策は遅々として進んでいないのが現状である。風力などの再生可能エネルギーが増えるとその変動性を補うためバックアップの火力発電所の建設が必要であるが、年間10~20%しか運転しない前提では経済性が成り立たず建設は遅々として進んでいない。再生可能エネルギー促進のためFIT(Feed-in Tariffs: 固定価格買取制度)が採用されているが、今ではドイツの電力料金は世界最高レベルとなり、さすがに反対が出てきている。送電網建設については、住民の反対で遅々として進まず、必要な長さの1/10しかできていない。さらに最大の問題は、2年前に実施したUnbundling(発送電分離)により、電力会社に供給義務がなく、供給不安に対して責任を取る人がいないことである。ドイツは日本より先行して再生可能エネルギーの大幅増加と原子力の将来廃止を打ち出したが、電力料金の大幅値上げ、電力の質の急速な低下など深刻な課題が起こっている。

## 2. 日本の産業復興を図るために

日本では理想的と思われるドイツでも原発停止に伴う対策が思うように進まず、年々事態は深刻になりつつあり、日本においてもドイツの先例をしっかり学び、今後の産業復興を図るための政策が必要となる。10年前と異なり、今では韓国や中国が日本の得意とする輸出製品の強力なライバルである。現在、韓国の電力料金は日本の約半分であり、これ以上、日本の電力料金が上昇すると日本の製造業、特に中小企業は危機的状況に陥る。

では、産業復興を図るため今後のあるべきエネルギー政策とは何なのか。エネルギー源は、石炭、天然ガス、原子力、再生可能エネルギーをバランスよく混合するのが望ましい。火力発電では高効率化、原子力では安全性向上、再生可能エネルギーでは経済性向上が最大の課題である。そこで、太陽光などの再生可能エネルギーにとどまらず、世界最新鋭の高効率火力発電にもFITに準ずる支援措置を実施すること、またコジェネ15%目標実現のために小型火力にも積極的な支援を実施するといった具体策が望まれる。しかし、造船業のように、かつての栄光に浸っては、中国、韓国に後れをとってしまう。過去の歴史を繰り返さぬよう、明確な国家戦略のもと官民一体で取り組む必要がある。

最後に、震災後の福島県の再生と復興に世界最新鋭の石炭火力IGCCの建設を提案したい。世界最高効率で世界で最も環境にやさしい最新鋭の石炭火力が福島に完成すれば福島復興のシンボルとなるのみならず、原子力の停止で負のスパイラルに陥りつつある電力会社に勇気と元気を与え、日本の産業復興にも貢献することになる。

## 3. エネルギーベストミックスの重要性

石炭、天然ガス、石油、原子力、再生可能エネルギーといった、これらのエネルギーベストミックスこそ無資源国日本にとって最重要な政策である。現代社会では、電気の供給は一瞬たりとも止められない。先進国の中で自給率僅か4%などという国は日本だけであり、この日本の最大の脆弱性をカバーすることこそ、あらゆる施策の根幹をなすものである。

さらに、注意喚起したいのは“原子力が動かなければ火力も潰れる”という関係にあることである。原子力が稼働しないために電力会社が大赤字になり、大幅な電力料金値上げになると、電力会社の信用力低下、給与カット、研究費カットなどで高効率最新鋭の火力を建設する積極的な前向きな会社などなくなってしまう。これでは

新しく建設される火力は旧態依然たる低効率で中国やインド製品を多用した安かろう悪かろうの低コスト至上主義になってしまう。これは、製造業の海外脱出や国内雇用喪失をさらに加速させる。

## 4. 世界への貢献

世界最高の効率とクリーンさを持つIGCCなどの日本の高効率発電技術を世界は待ち望んでいる。そのためには、日本国内で早く商用機を実現し、それをベースに製品輸出または技術輸出の形で世界に貢献していくことが、日本の繁栄と世界の環境維持を同時に実現する最良の道である。今なお世界の発電の40%は旧態依然たる石炭火力であり、世界で排出されるCO<sub>2</sub>の30%は火力発電によるものである。従来よりCO<sub>2</sub>を20%減少できる日本のIGCCを世界に普及できれば、日本一国のCO<sub>2</sub>発生量を補って余りあるCO<sub>2</sub>削減が可能である。また、途上国ではこれからも原子力の建設が相次いで予定されている。福島第一原発の事故の教訓を生かして安全性を極限まで高めることにより、原子力機器の高い製造力とも相まって、日本の原子力技術は世界最高のものとなり、世界のどの国よりも親切で、きめ細やかな技術の提供が出来ると思っている。

## VI. おわりに

原子力が今後減少する場合は、火力発電の比重はますます大きくなる。大規模火力発電の意義は徹底した高効率化とクリーン化にあり、現在の第2世代のダブル複合発電を確立し、さらに第3世代のトリプル複合発電の開発実用化を急ぐ必要がある。このトリプル複合発電こそ貴重な化石燃料の有効利用と地球温暖化防止を図る究極の解決策である。燃料については、天然ガスに偏重することなく石炭の利用も重要であり、エネルギーのベストミックスを考えていく必要がある。そのため、韓国や中国の厳しい追い上げの中、国のしっかりした戦略と戦術で強力な支援策を確立してブレークスルーを図っていくべきである。

### 著者紹介

金子祥三(かねこ・しょうぞう)

東京大学 生産技術研究所

(専門分野/関心分野)エネルギー工学/

高効率火力発電・地球温暖化問題



# 国際放射線防護委員会(ICRP)2007年勧告への道のり 放射線による健康障害の低減を目指して

医療法人 日高病院腫瘍センター 佐々木康人, 岡崎 篤

国際放射線防護委員会(ICRP)は非政府機関であるが、1928年の創立以来、放射線防護の理念と原則を勧告してきた。その勧告は国際原子力機関(IAEA)のより詳細な防護基準と共に、各国の放射線、RI防護管理規制に取り込まれてきた。原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)の報告に科学的根拠を置くICRP勧告は、科学的知見の進歩、防護技術の発展そして社会の動向に連動して進化してきた。「合理的に達成可能な限り低く“as low as reasonably achievable(ALARA)”」原則を重視する2007年勧告にいたる歴史と防護基準の変遷を解説した。

## I. はじめに

1895年11月、ドイツのビュルツブルグでレントゲンがX線を発見し、その性質を報告した。X線が物質を透過する性質と写真乾板を感光する性質は人体内部を透視する診断技術として直ちに活用された。1896年3月、フランスのパリでベクレルはウラン塩が自然に放射線を発する現象、放射能を発見した。キュリー夫妻はポロニウム、ラジウムという天然に存在する放射性同位元素(Radioisotope: RI)を分離精製し(1898年)、その娘イレーヌと夫フレデリック・ジョリオはアルミニウムにアルファ線を照射してリンのRIを作った。人工放射能の発見(1934年)である<sup>1)</sup>。

こうして人類が手にした天然及び人工放射線源は、医療をはじめ、工業、農業、基礎研究等様々な分野で利用され、人の生活に貢献してきた。また、電離放射線の認知は核物理・量子力学の発展を促し、20世紀中ごろには原子力エネルギーの軍事及び平和的利用の実用化を達成した。

一方、放射線の人体障害作用が1896年に報告されて以来、個人及び集団で多数の犠牲者を出した。原子力の利用も核兵器や事故を通じて多くの放射線被ばく者を出した(第1表)。電離放射線は両刃の剣なのである。放射線とRIの利用が急速に進むなかで、遅ればせながら、医療従事者の放射線防護の必要性が認識され、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)が活動を始め、今日では、全ての放

第1表 放射線障害と事故等による被ばくの実例

X線熱傷と脱毛	1896年
放射線誘発皮膚がん	1902年
放射線誘発白血病	1911年
ウラン鉱山労働者の肺がん	1924年
夜光塗料工員の骨肉腫	1934年
トロトラストの晩発障害	1942年
原爆被爆者の急性および晩発性障害	1945年
第五福龍丸乗組員の核実験による被ばく	1954年
スリーマイル島原発事故による被ばく	1979年
チェルノブイリ原発事故による被ばく	1986年
東海村JCO臨界事故による被ばく	1999年
福島原発放射能漏えい事故による被ばく	2011年

射線業務従事者、公衆、患者を放射線健康障害から守るための放射線防護規制を作成する国際的枠組みができている。この間のICRPの歩みをたどりながら<sup>2)</sup>、放射線健康障害の軽減を目指した防護基準の変遷を解説する。

### 1. 放射線源と被ばく

19世紀末から20世紀初頭にかけて、主として医療に用いられた放射線源はX線とラジウムであった。放射線医療に携わる職業人を放射線から守るために国際放射線医学会(International Society of Radiology: ISR)に国際X線ラジウム防護委員会(International X-ray and Radium Protection Committee: IXRPC)が創設されたのは1928年第2回ICR(International Congress of Radiology)においてであった。それに先立ち第1回ICRでは国際放射線単位・測定委員会(International Committee on Radiation Units and Measurements: ICRU)が設立された。放射線を測る国際標準の単位の制定がまず必要であったからである。

*The Road to ICRP 2007 Recommendations; Aiming at Mitigation of Radiation Health Hazards*: Yasuhito SASAKI, Atsushi OKAZAKI.

(2012年 11月 2日 受理)

各種の人工RIの利用や加速器、原子炉の開発など、新たな放射線源がその後急速に増加した。防護の対象も医療従事者から職業として放射線を取り扱うすべての職業人に拡大し、さらに一般公衆や患者へと広がった。そのため1950年にはIXRPCはICRPと改称して今日に至っている。第2次世界大戦後、米ソ冷戦の最中、大気圏内核爆発実験が各地で行われ、放射性降下物(fall out)が世界各地に降下した1950~60年代に一般公衆の防護の必要性が認知された。フォールアウトへの懸念が高まるなか1955年に国連総会で「原子放射線の影響に関する国連科学委員会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation:UNSCEAR)」が組織された<sup>3)</sup>。世界中の放射線源とその影響に関する情報を収集し、その科学的健全性を審査して、国連総会に報告するのが委員会に付託された任務である。

人類は、地球誕生以来存在する原始の放射線源や地球に到達する宇宙線に囲まれて、日常生活を営んでいる。この自然放射線のレベルには地域差があり、高自然放射線地域(イランのラムサル、インドのケララ、ブラジルのガラパリ、中国の陽江など)が注目され放射線健康影響研究の対象となっている。年間線量は数mSvから数百mSvに及ぶが住民の健康調査でがんの明らかな増加は報告されていない。ICRPが防護の対象とするのは当初、人工放射線源のみであったが、近年は自然放射線源のなかで制御可能なものは防護の対象としている。鉱山などの職場や家屋内のラドン、航空機乗務員の宇宙線による被ばくなどがその例である。

放射線源に曝され、人が放射線を受けることを被ばくと言う。被ばくは線源から直接受ける場合もあるし、線源から漏洩した放射線で汚染した環境から放射線を受ける場合もある。放射線防護では線源そのもの、被ばくをもたらす様々な経路、被ばくする人に対して防護対策を講じる。

放射線の受け方も様々であり、それによる被ばくの影響も異なる、全身の被ばくと局所の被ばく、一度か極短期間の急性被ばくと年余にわたる慢性被ばく、外部線源による体外被ばくと体内に摂取された線源による内部被ばくなどである。自然放射線による被ばくの世界平均は年間2.4mSvと報告されている<sup>4)</sup>。

## 2. 高線量放射線の人体影響

高い線量の放射線を一度または比較的短期間に全身に受けると、吐き気、おう吐、下痢、頭痛、皮膚のやけど、脱毛、発熱、意識障害などの症状や白血球や血小板の減少などの急性放射線症候群と呼ばれる身体症状が、受ける線量に応じて生じる。放射線量が多いほど症状は早く、強く出る。放射線を受けてから症状が出るまでに潜伏期間があるのが特徴である。症状の出る最低の線量があり、それ以下の量の放射線を受けてもその症状は発症

しない。この線量をしきい線量と呼ぶ。しきい線量のある身体的影響を組織反応または確定的影響と呼ぶ。ICRPでは同等の線量を受けた集団の1%に発症する線量を推定してしきい値としている。このような急性全身被ばくの実例として、我が国では原爆被爆者や東海村JCOの臨界事故などがある。局所被ばくを含め一般的に確定的影響は1グレイ(1,000ミリグレイ、X線、ベータ線、ガンマ線では1,000ミリシーベルトと等価)以上の被ばくで確実に発症する。

## 3. 低線量被ばくの発がんリスク

前節で述べた「有害な組織反応(確定的影響)」と区別される放射線の影響がある。高線量でも低線量でも見られる放射線誘発がんや世代を超えて出現する遺伝的影響である。原爆被爆者の長年にわたる健康影響調査により、被ばくのある集団では被ばくのない集団と比べて白血病やがんによる死亡やその罹患頻度が高まることが報告された。100~150mSv以上被ばくした被爆者では、がん罹患や死亡が線量に比例して増加することが統計学的に明らかにされた。ただし影響が発現するのは、早くて数年後、多くは10年20年後のこと(晩発障害)であり、放射線誘発がんが自然におこるがんや区別できるわけではない。100~150mSv以下の線量で統計学的に有意ながんの増加が認められなかったのは、10数万人の原爆被爆者の疫学調査ではバックグラウンドのがん罹患、死亡の地域的変動(10%程度)などと区別がつかないほど低い発生頻度であるためである。放射線防護上は、高い線量で見られる直線的線量-反応関係が100mSv以下の低線量でも認められると仮定して防護体系が策定されている。いわゆる直線しきい値なし(linear non-threshold:LNT)モデルの採用である。X線やガンマ線の低線量および低線量率被ばく(単位時間当たりの線量が小さい、長期にわたる慢性被ばく)は高線量および高線量率(単位時間当たりの線量の大きい急性被ばく)と比較して影響が少ないことが知られている。この線量・線量率効果係数(dose and dose rate effectiveness factor:DDREF)の値には議論があるが、ICRPはDDREF2を採用して、年齢、性別、人種差を平均化した標準的集団の名目リスク係数を求めている。長期間にわたる放射線被ばくにより誘発される発がんまたはがんによる過剰死亡の生涯リスクは、原爆被爆による一度の全身被ばくのリスク1Sv当たり10%の1/2と見做して、1Sv当たりおよそ5%である。LNTモデルを用いると100mSvでは0.5%、10mSvでは0.05%、1mSvでは0.005%のリスクとなる。

現在までの知見では、低線量被ばくによる発がんに「しきい値がない」という命題を証明することも否定することもできない。UNSCEARやICRPは「証拠の重み(weight of evidence)」はLNT仮説に傾いていると判断しているが、異論もある<sup>5)</sup>。

4. 放射線の健康影響

2, 3 節で述べたことから, 放射線の人体への健康影響には 2 種類あることが分かる。しきい線量を超える高い線量でおこる身体的影響(組織反応または確定的影響)と放射線を受けた後, 5~10年以上を経たおこる可能性(リスク)がある発がん(確率的影響)である(第1図)。前者は放射線があたった細胞が多数死ぬことにより, 組織が傷害され, 臓器の働きが悪くなり, 大線量により多数の臓器, 組織が強い影響を受けると個体が死にいたる可能性のある損傷である。後者は放射線の障害作用を受けた細胞が, 遺伝子に傷を持ったまま生き続け, この変異にさらに幾つもの変異が重なった結果ある確率で細胞ががん化する影響である。線量が高いほど発がんの確率(リスク)が高くなる。100mSv 以下の低線量では自然の発がんの地域差や人種差のなかにうずもれて検出されない程度の, あるとしても極めて小さなりスクと考えられる。

100mSv 以下の低線量被ばくでも発がんのリスクは高線量の場合と同様に, 線量に比例して存在すると想定(LNT モデル)して, 不必要な放射線被ばくは極力低減しようと試みるのが放射線防護の原則である。

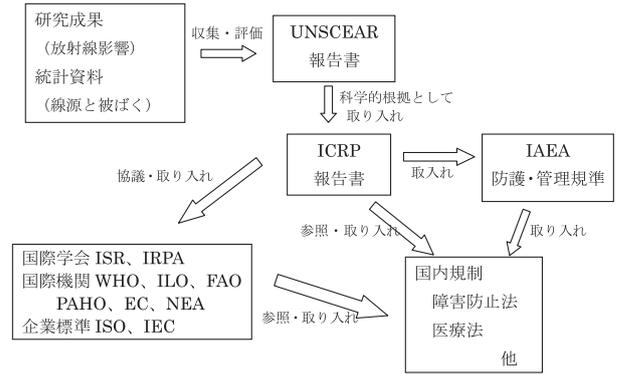
5. 放射線防護基準作成の国際的枠組み

現在では放射線防護・管理基準作成の国際的枠組みが確立している(第2図)。UNSCEAR 報告を科学的根拠として, ICRP が放射線防護の理念と原則を勧告する。これを受けて, 国際原子力機関(International Atomic Energy Agency :IAEA)がより具体的な基本防護基準(Basic Safety Standards :BSS)を作成する。これら勧告や基準をもとに各国の放射線, RI 防護・管理規制が作成される。現行の我が国放射線障害防止法は ICRP 1990 年勧告の多くを取り入れて2001年4月に改定された。

ICRP は2000年頃から1990年勧告の改定作業を開始し, 2007年12月に新勧告を公表した<sup>6,7)</sup>。

6. 2007年新勧告の防護体系

2007年勧告では, 3つの被ばく状況に基づいて防護の体系を構築している。平常時に放射線被ばくを伴う業務



第2図 放射線防護規制作成の国際的枠組み

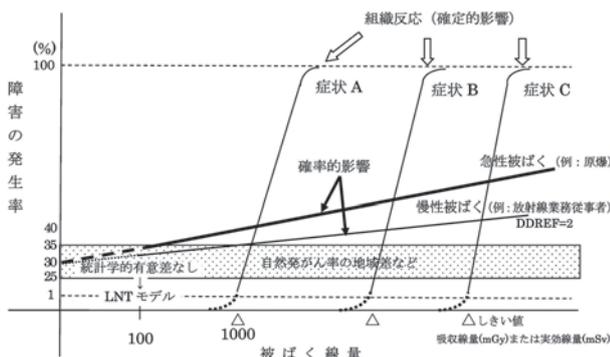
の遂行に当たり, 放射線防護対策を計画的に実施できる状況を「計画被ばく状況」と呼ぶ。線源や被ばくを制御できない, 事故あるいは線源利用によるテロによる被ばくなどの非常事態を「緊急時被ばく状況」, 非常事態からの復旧期などの被ばくを「現存被ばく状況」と呼ぶ。各状況に対して, 被ばくの分類(職業被ばく, 公衆被ばく, 患者の医療被ばく)毎に防護体系が勧告されている。

放射線防護の基本原則は, 行為の正当化(justification), 防護の最適化(optimization)および個人の線量限度(individual dose limits)である。計画被ばく状況では職業被ばくと公衆被ばくに線量限度を適用する。職業被ばくでは5年間で100mSv, 特定の1年間では50 mSv, 公衆被ばくは年間 1 mSv の線量限度を超えないように防護・管理する。その上で限度以下に拘束値を定め被ばく線量を合理的に達成可能な限り低減(as low as reasonably achievable :ALARA)するのが最適化である<sup>8)</sup>。社会的, 経済的要因を考慮するという条件が付く。患者の医療被ばくには線量限度を適用しないが, 診断参考値を用いて最適化する。緊急時被ばく状況, 現存被ばく状況では線量限度は用いず, 参考レベルを設定して防護対策(最適化)を実施する(第2表)。公衆被ばくの参考レベルは緊急時被ばく状況では20~100mSv の枠内で, 現存被ばく状況では1~20mSv の枠内で, 状況に応じて適切な参考レベルを選定して, 最適化をはかる。参考レベルの選定には専門家だけでなく, 被ばくする可能性のある住民を含む関係者(stakeholders)の関与が重要である。

第2表 ICRP 放射線防護体系での線量限度と線量拘束, 参考レベルの利用

被ばくの状況/種類	職業	公衆	医療
計画	限度 拘束	限度 拘束	診断参考
緊急時	参考	参考	—
現存	—(注)	参考	—

(注) : 計画職業被ばくの一部として取り扱う



注1、しきい値: 集団の1%が発症する線量

第1図 線量—反応関係のイメージ

第3表 ICRPの防護体系の変遷

	過 去		現 在
勧告の対象	医療従事者の被ばく	全職業被ばく	職業被ばく 公衆被ばく 患者等の医療被ばく
防護の対象	人の防護	環境は防護されると想定	環境(人以外の生物種)の防護
防護の目的	確定的影響の回避	確率的影響の認知	確定的影響の回避 確率的影響の極小化
防護の中核	実際の助言	線量限度	拘束値と参考レベル (最適化の重視)

7. 防護のための実効線量(シーベルト)

確率的影響には放射線誘発がんと生殖細胞の変異に起因する遺伝的(経世代)影響がある。遺伝的影響は人ではこれまで報告されていないので、人での確率的影響は将来の発がん、またはがんで死亡するリスクとして評価される。確率的影響のリスクに注目して、その評価に用いられる線量が実効線量(effective dose)である。放射線防護の中核をなす線量単位であり、放射線防護の計画に当たって防護基準として前向き(prospective)に使用すべき線量とされている。また、防護対策の遵守や成果を確認するための指標としても使用できる。

8. 防護基準の変遷

放射線による皮膚の熱傷と脱毛が1896年に報告されて以来、放射線の身体障害作用が知られるようになった。医療従事者を保護する目的で、就労時間制限と休養の奨励、線源から距離をとる、線源を遮蔽するといった実際的な助言が急性障害に対する最初の防護対策であった。

今日、確率的影響のリスク指標として用いられる実効線量(Sv)に直せば、年間500mSv(1934年)、150mSv(1950年)相当の定量的限度(最大許容線量)をICRPが勧告した時も放射線業務従事者の被ばくを皮膚や骨髄障害の出現する線量(しきい値)以下に抑えるのが目的であった。

その後も科学的知見の更新、技術の進歩、社会の動向を組み入れて、放射線防護基準は変遷してきた。組織反応(確定的影響)の回避を目的として始まった防護基準の策定は、確率的影響の認知を経て、防護の目的が確定的影響の回避と確率的影響の最小化へと変遷した。実際の助言で始まった防護基準は、線量限度を中核とし社会全体の防護を旗印にした時期を経て、最適化を重視する個人の被ばく防護へと変化してきた<sup>9)</sup>(第3表)。

最新の2007年勧告では制御可能な全ての線源による制御可能な被ばくについて、全ての状況における被ばくを取り扱っている。人だけでなく環境(人以外の生物種)の防護を視野にいたした防護体系を提案し、防護手法として最適化を中核に据えている。

—参考文献—

- 1) 清水栄, 放射能研究の初期の歴史, 丸善京都出版サービスセンター, (2004).
- 2) Clarke, R.H., Valentin, J., The History of ICRP and the Evolution of its Policies, *Annals of ICRP*, **39**(1): 75-110 (2009).
- 3) 佐々木康人, 土居雅広, 国連による放射線影響調査—UNSCEAR半世紀の歴史と将来展望, エネルギーレビュー, **26**(3), 40-43(2006).
- 4) 放射線医学総合研究所監訳発行, UNSCEAR 2008年報告書, 第1巻 線源, (2012).
- 5) 日本アイソトープ協会翻訳発行, ICRPのPublication 99放射線関連がんリスクの低線量への外挿, (2011).
- 6) 佐々木康人, ICRP新勧告作成の経緯と主要な論点 1. 作成の経緯, *Isotope News* 641: 14-16, 2009.
- 7) 日本アイソトープ協会翻訳発行, ICRPのPublication 103国際放射線防護委員会の2007年勧告, (2009).
- 8) 佐々木康人, 放射線防護の最適化, *Isotope News* 689: 14-18, 2011.
- 9) 佐々木康人, 安田仲宏, 放射線防護基準の変遷, *Isotope News* 695: 34-43, 2012.

著者紹介



佐々木康人(ささき・やすひと)  
医療法人日高病院腫瘍センター特別顧問  
ICRP委員, UNSCEAR日本代表・議長。  
(非常勤)  
(専門分野)放射性同位元素(RI)を用いて  
疾病の診断や治療をする核医学。  
(関心分野)放射線健康影響, 防護。



岡崎 篤(おかざき・あつし)  
医療法人日高病院腫瘍センター長  
(専門分野)放射線腫瘍学で放射線治療  
(Tomo Therapy), 核医学(PET/CT), ハ  
イパーサーミア等を統括。  
(関心分野)がん相談を實踐して「がん難民」  
の撲滅を目指している。放射線防護は共通  
の関心事。

# 現存被ばく状況における参考レベルの適用 汚染の状況に応じた段階的な線量低減に向けて

電力中央研究所 荻野 晴之, 浜田 信行, 杉山 大輔

「参考レベル」を用いた放射線防護の最適化は、事故後の汚染地域の復興において重要である。放射線の健康リスクと社会的・経済的な影響とのバランスを考えながら、汚染の状況を見極めて段階的に平時を目指していく必要がある。本稿では、国際放射線防護委員会(ICRP)が勧告する「参考レベル」の考え方について解説する。そして、福島第一原子力発電所事故後に講じられた「除染スクリーニング基準」「食品の暫定規制値と新基準値」「放射性物質による汚染物の管理基準」の3例を取り上げ、段階的な参考レベルの適用について考察する。

## I. 低線量放射線に対する防護の考え方

福島第一原子力発電所事故後、低線量放射線の健康影響と放射線防護基準の考え方を巡り、多くの疑問や不安が社会に生じた。「なぜ、事故後の防護基準は平時と異なるのか」「食品の新基準値が定められたということは、古い基準は危険だったのか」などが挙げられる。

高線量放射線の健康影響については、多くの科学的知見がある。一方で、およそ100ミリシーベルト(mSv)以下の低線量放射線が及ぼす健康影響については、国際的にも議論が続いている。これは主に、放射線によるリスクが他の要因によるリスクと区別できないほど小さいためである。「あったとしてもこの範囲」という知見は得られている。しかし、「よく分かっていない」という端折った表現が先行し、「分かっていないのなら危険だ」という誤解が生まれ、社会の不安に拍車をかけた。

国際放射線防護委員会(ICRP)は、放射線防護の観点からは、たとえ線量がどんなに低くても、線量に応じたリスクがあると仮定し、社会的・経済的な影響を考慮した上で、合理的に達成可能な限り被ばく線量の低減を図るべき、との立場を取っている。このため、皮膚紅斑などの確定的影響に対する「安全」と「危険」とを分けるような「しきい値」とは異なり、がんなどの確率的影響に対しては、「しきい値」の考え方が存在せず、線量低減の対策を講じる目安として「参考レベル」が示されている。

平時の判断のために定められた基準(線量限度)を事故後の状況に厳格に適用すると、住民の大量避難や生産活

動の混乱などを招き、社会的・経済的に大きな影響が生じるおそれがある。そのため、放射線の健康リスクとのバランスを考えながら、年間100 mSvより下の範囲において、「参考レベル」という形で一時的に許容される被ばく線量を平時より引き上げ、汚染の状況を見極めながら段階的に平時を目指していくことが、ICRPが勧告する放射線防護の基本的な考え方である。

原子力安全委員会(以下、原安委)は2011年7月19日、復興に向けた放射線防護においては、ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>で示された「参考レベル」の考え方を適用することが適切と判断した。今後、汚染地域の復興を遂げるためには、「参考レベル」の考え方について理解を深め、被ばく線量の低減を図る努力を続けていくことが重要となる。

本稿では、ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>の記述を抜粋しながら、放射線防護の原理・原則に立ち返り、「参考レベル」の考え方について解説する。そして、事故後に講じられた防護措置の中から、除染スクリーニング基準、食品の暫定規制値と新基準値、放射性物質による汚染物の管理基準の3例を取り上げ、段階的な参考レベルの適用について考察する。なお、ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>については、2010年の本誌連載講座「ICRP 新勧告—新しい放射線防護の考え方と基準(全8回)」も併せてご覧頂きたい。

## II. 放射線防護の「原理・原則」

### 1. 線源関連のアプローチ

ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>以前の主勧告であるICRP 1990年勧告<sup>2)</sup>では、有害な確定的影響のしきい値よりも個人線量が十分に低い場合、ある線源(次節で解説)の個人線量への寄与の影響は、他の線源からの線量の影響と無関係であると指摘されている。個人はいくつかの線源に被ばくしうが、放射線防護の目的のためには、各線源または各線源群を通常は独立に扱うことが可能となり、これに

*Application of Reference Levels in the Existing Exposure Situations ; Towards Stepwise Reduction of Radiation Dose Depending on Situations of Contamination :Haruyuki OGINO, Nobuyuki HAMADA, Daisuke SUGIYAMA.*

(2012年 12月10日 受理)

よって、線源または線源群に被ばくする可能性のあるすべての個人の被ばくを考慮することになる。この手順は、「線源関連のアプローチ」と呼ばれており、ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>では、この線源関連のアプローチが防護において最も重要であることが強調された。そして、複数の線源がある場合には線源関連のアプローチでは十分な防護を提供しないという議論もありうるとしながらも、たいいてい場合には支配的な線源があるため、適切な「参考レベル」の選択によって、適切な防護レベルが保証されたとしている。

## 2. 「線源」の定義

線源関連のアプローチを適用する場合、「線源」を設定する必要がある。ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>では、線源の例として、単一の物理的な線源(放射性物質やX線装置など)、施設(病院、原子力発電所など)、もしくは手法あるいは類似の特性を持つ物理的線源(核医学的手法またはバックグラウンドもしくは環境放射線)が挙げられている。放射性物質が施設から環境に放出されるような場合にはその施設全体が1つの線源と見なされ、放射性物質が既に環境中に分散しているような場合には部分的な放射性物質の集合も線源と考えられるとしている。また、線源の定義は、一般に、最適化にふさわしい適切な防護戦略の選択に結びつくとされているため、対策を考える各状況の中で線源を定めることができるものと理解できる。

## 3. 被ばく状況

ICRP 1990年勧告<sup>2)</sup>では、行為(個人の被ばくや被ばくする人数を増加させるような人間の活動)と介入(全体的な被ばくを減らす人間の活動)というプロセスに基づく防護手法が採用されていた。この考え方はICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>でさらに発展し、3種類の被ばく状況、すなわち、計画被ばく状況、緊急時被ばく状況および現存被ばく状況の特性に基づく防護手法が採用された。以下に、各被ばく状況の定義を示す。

**計画被ばく状況**：線源の意図的な導入と運用を伴う状況。発生が予想される被ばく(通常被ばく)と発生が予想されない被ばく(潜在被ばく)の両方を生じさせることがある。

**緊急時被ばく状況**：計画された状況を運用する間に、もしくは悪意ある行動から、あるいは他の予想しない状況から発生する可能性がある、好ましくない結果を避けたり減らしたりするために緊急の対策を必要とする被ばく状況。

**現存被ばく状況**：管理についての決定をしなければならぬ時に既に存在する被ばく状況。緊急事態後の長期被ばく状況はこれに含まれる。

## 4. 放射線防護の原則

線源関連の原則として、すべての被ばく状況に対して適用される、「正当化の原則」と「防護の最適化の原則」がある。そして、個人関連の原則として、計画被ばく状況に限定して適用される、「線量限度の適用の原則」がある。以下に、各原則の定義を示す。

**正当化の原則**：放射線被ばくの状況を変化させるいかなる決定も、害より便益を大きくすべきである。

新たな放射線源を追加することや現存する被ばくを減らすこと、潜在被ばくのリスクを減らすことで、それがもたらす損害を相殺するのに十分な個人的あるいは社会的便益を達成すべきである。

**防護の最適化の原則**：被ばくする可能性、被ばくする人の数、およびその人たちの個人線量の大きさは、すべて、経済的および社会的な要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保たれるべきである。

防護のレベルは一般的な事情の下において最善であるべきであり、害を上回る便益の幅を最大にすべきである。この最適化手法の大幅に不公平な結果を回避するために、線量拘束値またはリスク拘束値、および参考レベルを設定することで、特定の線源からの個人に対する線量またはリスクを制限するべきである。

**線量限度の適用の原則**：患者の医療被ばくを除く計画被ばく状況において、規制された線源からのいかなる個人への総線量も、ICRPが勧告する適切な限度を超えるべきではない。

## Ⅲ. 「線量限度」と「参考レベル」

計画被ばく状況における一般公衆に対する放射線防護では、自然放射線被ばくと医療被ばく以外に、管理された線源からの被ばくが実効線量で年間1 mSvに収まるように、個人関連の被ばくが管理されてきた。また、現存被ばく状況における一般公衆に対する放射線防護では、参考レベルを年間1~20 mSvの範囲から設定し、防護の最適化を履行するよう勧告されている。つまり、年間1 mSvという線量は、計画被ばく状況における個人関連の線量限度として用いられる場合と、現存被ばく状況における線源関連の参考レベルの最下限値として用いられる場合がある。

この年間1 mSvという線量は、どの程度の放射線リスクなのだろうか。ICRP 1990年勧告<sup>2)</sup>によれば、線量限度としての年間1 mSvという判断にあたっては、少なくとも2つの考え方があったとされている。一つめの考え方は、広島と長崎の原爆被爆生存者の疫学調査を基軸とした、放射線リスク推定モデルを用いた判断である。相乗的リスク予測モデル(自然がん死亡確率に対する放射線被ばくによって増加するがん死亡確率の比が生涯継続すると仮定)を用いて、線量・線量率効果係数(単位線量あたりの生物学的効果が低線量・低線量率の放射

線被ばくでは高線量・高線量率における放射線被ばくと比較して通常低いことを一般化した、判断によって決められた係数)を2とした場合に、年間1 mSvの被ばくが75年間継続しても、条件付きがん年死亡確率は100万人あたり95人という程度( $10^{-4}$ を超えない)にしかならない、とされた。二つめの考え方は、自然放射線量の変動幅を用いた判断である。非常に変動しやすいラドンによる被ばくを除けば、自然放射線源からの被ばく線量は年間約1 mSvであり、海拔の高い場所やある地域では2倍以上の被ばく線量になる。

このような放射線リスク推定モデルや自然放射線レベル等を多面的に考慮することによって、年間1 mSvという計画被ばく状況における公衆の線量限度は選択されている。つまり、ある判断によって許容されるとして設定された線量限度以下に収まるように公衆被ばくが管理されてきたということであり、線量限度が“安全”と“危険”の境界を表すものとして定められていないことを理解する必要がある。

ひとたび、原子力事故や放射線緊急事態が発生すると、放射線リスク管理の前提となる放射線源の存在する環境が一変する。防護措置の性格も変わり、ヒトの確定的な健康影響に直接関係するものから、生活の質に関わるものまでを扱うことになる。このような緊急の対策が必要となる状況、すなわち、緊急時被ばく状況では、平時の判断とは異なり、線量限度は適用されず、参考レベルという考え方が登場する。

原子力事故や放射線緊急事態の発生から時間が経過すると、様々な主体により放射線測定が実施され、放射線源の存在する環境に関する知見が集約されることになる。そして、個々の住民が環境中に存在する管理可能な線源との長期的な共存生活を考える状況、すなわち、現存被ばく状況を迎える。この現存被ばく状況においても、線量限度は適用されず、参考レベルを用いた放射線防護の最適化が焦点となる。経済的および社会的要因を考慮し、被ばくを合理的に達成できる限り低く抑える(ALARA)という最適化を履行する上では、個々の居住環境に合わせた条件の中で、住民参加型意思決定と自助的な活動が重要であることがチェルノブイリ事故の経験から示されている<sup>3)</sup>。

#### IV. 参考レベルの適用に関する考察

「防護の最適化の原則」の履行は線源関連のプロセスであり、その時点で広く見られる状況下における最善の防護戦略が選ばれ、便益と害の差が最大化される必要がある。ICRPは、現存被ばく状況における参考レベルは、年間1~20 mSvのバンドから選択されるべきであると勧告している<sup>1)</sup>。そして、現存被ばく状況にとっての長期目標は、被ばくを平時と考えられるレベルに近いあるいは同等のレベルまで引き下げることであるため、参考

レベルは年間1~20 mSvのバンドの下方部分から選択されるべきであると勧告している<sup>3)</sup>。また、国の規制当局に対しては、その時点で広く見られる状況を考慮に入れ、また、復興計画全体のタイミングを利用して、状況を徐々に改善するための「中間的な参考レベル」を採用してもよいと勧告している。なお、過去の経験から、長期の事故後の状況における最適化プロセスを拘束するために用いられる代表的な値が年間1 mSvであることが示されている。現存被ばく状況における線源関連の「参考レベル」の最下限値である「年間1 mSv」は、このような文脈の中で理解すべきである。

防護の最適化プロセスは、防護戦略の履行が正当化された状況に対して適用するためのものであり、判断を含む性質を有するため、透明性が強く求められる。この透明性は、十分な説明を受けた上での決定を目指すために、すべての関連情報がステークホルダ(利害関係者)に提供されていることに加え、意思決定プロセスのトレーサビリティ(追跡可能性)が適切に文書化されていることを前提としている。

以下では、福島第一原子力発電所事故後に講じられた防護措置の中から、除染スクリーニング基準、食品の暫定規制値と新基準値、放射性物質による汚染物の管理基準の3件を取り上げ、段階的な参考レベルの適用について考察を加える。

##### 1. 除染スクリーニング基準

平時の放射線管理では、管理区域から人が退去し、物品を持ち出そうとする場合には、その者の身体や物品の表面の放射性物質の密度は、表面密度限度(アルファ線を放出する核種では4 Bq/cm<sup>2</sup>、アルファ線を放出しない核種では40 Bq/cm<sup>2</sup>)の1/10以下でなければならないと定められている。平時の放射線管理の現場では、放射線障害防止法等で定められた基準以下であっても有意な汚染が検出されるような場合には、該当箇所を合理的な範囲で除染した上で持ち出すことが一般的である。

しかし、事故後、広範囲に及ぶ地域で人体や物品が同時に汚染するという事態に至った。さらに、震災直後は、断水や停電の影響もあって全員の除染を行えず、低気温のため脱衣も困難な状態が続いた。このような場合に対して、平時の基準を厳格に適用することは現実的ではない。誰を、どの汚染物を、それぞれ優先的に除染するか、ある科学的な判断基準に従って分別する必要が生じる。そこで登場する考え方がスクリーニング(ふるい分け)である。福島県は、事故前、緊急医療被ばくの観点から、スクリーニングレベルを40 Bq/cm<sup>2</sup>(一般的な放射線測定器であるGMサーベイメータで13,000 cpm相当)と設定していたが、上述のような状況を踏まえ、2011年3月14日以降は、GMサーベイメータの最大レンジである100,000 cpmに引き上げるという判断を行った。cpm

(counts per minute)とは、1分間あたりの放射線測定器の計測数である。

筆者らは、100,000 cpm相当の表面汚染が物品に存在した場合と皮膚表面に直接沈着した場合を想定し、全身の実効線量と皮膚の局所的な吸収線量を評価した<sup>4)</sup>。その結果、物品から受ける全身の被ばく線量は線源関連の「参考レベル」の最下限値である年間1 mSvを下回っており、皮膚の局所的な吸収線量も毎時1 mGy以下であることを明らかにした。現実的な被ばく時間を考慮すれば、脱毛や潰瘍などの確定的影響の発生(しきい値はGyオーダー)から皮膚は防護されていると考えられる<sup>4)</sup>。

原安委は2011年8月29日、避難区域(警戒区域)外への放射性物質による汚染拡大の防止を目的として、スクリーニング基準を段階的に低減していくことが望ましいと助言した。そして、原子力災害現地対策本部は2011年9月16日以降、この助言等を踏まえ、13,000 cpmを新しいスクリーニング基準とした。今後は、モニタリングの結果や避難区域(警戒区域)入退域の進行状況等を総合的に勘案し、平時の基準との接続性を考慮しながら、スクリーニング基準を段階的に引き下げる努力を続けていくことが重要である。

## 2. 食品の暫定規制値と新基準値

放射性物質に汚染された食品の規制は、内部被ばく低減の観点から重要である。災害対策本部等が食品規制を導入する必要があるか検討を開始するための目安として、原安委は事故以前から指標値を設定していたが、食品規制のための規制値は設定されていなかった。厚生労働省は2011年3月17日、この指標値を準用して、食品中の放射性物質に関する暫定規制値を設定し、暫定規制値を上回る食品の出荷や摂取が制限されてきた。

筆者らは、事故後の最初の3ヶ月に実施された食品規制と暫定規制値の設定根拠について整理し、今回の食品規制の課題を抽出し、改善策を提案した<sup>5,6)</sup>。また、事故後の最初の1年間に実施された食品規制についても整理した<sup>7)</sup>。食品規制に関する課題に関しては、放射性ヨウ素に対する指標値が食品を網羅していなかったことや、指標値が設定されていなかった魚介類の暫定規制値が追加され、飲料水と乳類の暫定規制値が指標値を変更して設定されたことによって、指標値を設定した当初の論理が乱れたことを指摘した。さらに、事故後の早期の緊急時被ばく状況とその後の現存被ばく状況を区別することなく、同じ指標値(介入線量レベル5 mSvに相当)が設定されていたことで社会的な混乱が生じたことを指摘した。

これらの課題を改善するために、筆者らは、段階的な「参考レベル」の考え方を提案してきた<sup>5,6)</sup>。この考え方では、事故現場から近くの場所と遠くの場所における被ばく状況の違いと、規制値の実用性を勘案して、緊急時被

ばく状況から現存被ばく状況までの期間を、早期(第1期)、中期(第2期)、後期(第3期)の3つに分類し、それぞれの期間に段階的な「参考レベル」を設定し、公衆の被ばく線量を段階的に低減する。さらに、それぞれの期間に、規制値に相当する運用参考レベルを設定する。運用参考レベルは、各期間の「参考レベル」を上回らないように、全ての食品、放射性核種、年齢群に対して適用可能な値として設定される。各期間における参考レベルの選定にあたっては、例えば、早期については緊急時被ばく状況における参考レベルの上限値(年間100 mSv)の1/10である年間10 mSv、後期については現存被ばく状況における参考レベルの最下限値である年間1 mSv、そして、中期については、年間10 mSvと年間1 mSvの間をとって、年間5 mSvとすることが適切であると考えられた<sup>5,6)</sup>。

2012年4月1日、厚生労働省は、より一層、食品の安全と安心を確保するとして、暫定規制値に代わり長期的な状況に対応するため、食品の新基準値を設定した。汚染食品に起因する追加の被ばく線量が年間5 mSvから年間1 mSvに引き下げられ、放射性セシウムの基準値が設定された。汚染食品を一つの線源群として考えた場合、現存被ばく状況における参考レベルの最下限値である年間1 mSvを採用した措置と理解できる。

## 3. 放射性物質による汚染物の管理基準

事故後、環境に放出された放射性核種によって汚染した物(がれき等の廃棄物、汚泥、焼却灰、除染による除去土壌等。以下、「汚染物」と記述する)が、広域にわたって、大量に発生することとなった。汚染物の処分の安全性に関しては、原子力災害対策本部の「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取扱いに関する考え方」に示された考え方、すなわち、処分施設の管理期間終了以後、周辺住民の受ける線量が、科学的に確からしいシナリオ想定に基づく評価(基本シナリオ)において年間0.01 mSv以下であり、基本シナリオに対する変動要因を考慮した評価(変動シナリオ)が年間0.3 mSv以下であるとの「めやす」に基づき判断することとされた。さらに、埋設処分施設の操業中の周辺住民の被ばく線量、あるいは作業員の被ばく線量が「年間1 mSv」を下回ることを考え、放射性セシウム濃度が8,000 Bq/kg以下の汚染物は埋設処分が可能であり、さらに、放射性セシウム濃度が100,000 Bq/kg以下の汚染物は、平時において放射性物質を含まない一般廃棄物の管理型処分場相当の施設に仮置きが可能であるとされた。

上記の「めやす」は、計画被ばく状況における放射性廃棄物の処分に関して整備された指針<sup>8)</sup>に基づいたものである。また、「年間1 mSv」は、計画被ばく状況における個人関連の線量限度の意味を持つものと考えられる。これらのことは、汚染物の管理を行う範囲が、福島第一原

子力発電所から離れており、環境汚染の程度が高くない地域においても必要となったことへの配慮であると理解できる。

一方、土壌汚染によって、環境の放射線レベルが年間数 mSv～数十 mSv となった地域において進める環境修復(除染等)に対して、上記の基準を適用した場合には、汚染物の管理や、遡って汚染物の発生につながる除染が制限されるか、もしくは厳重な措置を求められ、環境修復に支障をきたすことも懸念される。

放射線防護の原則である最適化の観点からは、現実的に被ばくの低減が進められるように、それぞれの状況に応じた管理基準が適用されることが適切と考えられる。環境の放射線レベルが上昇した現存被ばく状況では、ICRP 2007年勧告<sup>1)</sup>に示された年間1～20 mSv の範囲から、線源関連の参考レベルとして汚染物の管理基準を、現存被ばく状況にあるステークホルダとの情報共有を十分に行って選定することが望まれる。最初の段階では年間数 mSv～数十 mSv という基準を選択し、環境の放射線レベルの低減が進めば、参考レベルを段階的に引き下げる、という取り組みを継続することによって、現実的かつ着実な環境修復が可能と考える<sup>9)</sup>。

## V. おわりに

原子力事故後の放射線防護は、平時の範囲をはるかに超えたものであり、経済、政治、環境、社会、心理学的な側面にまで影響を及ぼす。現存被ばく状況における放射線防護の最適化を円滑に履行するには、「参考レベル」の考え方について理解を深めた上で、環境中に存在する管理可能な線源との長期的な共存生活を考えながら、状況に応じた段階的な被ばく線量の低減を図る努力を続けていくことが重要である。「言うは易く、行うは難し」であることを痛感しつつも、本解説が読者の理解の一助、そして、汚染地域の復興に少しでも貢献できれば幸いである。

### —参考資料—

- 1) International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP, 37(2007).
- 2) International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21(1991).

- 3) International Commission on Radiological Protection, Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency, ICRP Publication 111, Annals of the ICRP, 39(2009).
- 4) H. Ogino, T. Ichiji, T. Hattori, Verification of screening level for decontamination implemented after Fukushima nuclear accident, *Radiat. Prot. Dosim.*, **151**, 36-42(2012).
- 5) N. Hamada, H. Ogino, Food safety regulations: what we learned from the Fukushima nuclear accident, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 83-99(2012).
- 6) 浜田信行, 荻野晴之, 福島原子力発電所事故での食品安全規制の課題と改善策, 電力中央研究所報告, L 11001, (2011).
- 7) N. Hamada, H. Ogino, Y. Fujimichi, Safety regulations of food and water implemented in the first year following the Fukushima nuclear accident, *J. Radiat. Res.*, **53**, 641-671(2012).
- 8) 原子力安全委員会, 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方, 平成22年8月9日.
- 9) D. Sugiyama, T. Hattori, Radiological protection from radioactive waste management in existing exposure situations resulting from a nuclear accident, *Radiat. Prot. Dosim.*, **153**, 74-79(2013).

### 著者紹介



荻野晴之(おぎの・はるゆき)  
電力中央研究所 原子力技術研究所  
(専門分野/関心分野)放射線防護/線量評価



浜田信行(はまだ・のぶゆき)  
電力中央研究所 原子力技術研究所  
(専門分野/関心分野)放射線生物/放射線影響



杉山大輔(すぎやま・だいすけ)  
電力中央研究所 原子力技術研究所  
(専門分野/関心分野)放射線防護/放射性廃棄物処分

## 解説

# プルトニウムのトリレンマにいかに対処するか 原子力政策転換に伴うプルトニウム核不拡散への対応

日本原子力研究開発機構, 久野 祐輔(代表)  
東京大学大学院

昨年9月にエネルギー・環境会議が示した「革新的エネルギー・環境戦略」では、2030年代に原発稼働ゼロを可能とするよう政策資源を投入する一方で、国際的責務を果たしつつ、引き続き従来の方針に従い再処理事業に取り組むとした。その結果、「利用目的のないプルトニウムを持たない」という核不拡散政策上のこれまでの考え方との整合性をいかに確保するかという大きな課題が残された。プルトニウムについての明確な方向性を示さない限り、米国を含む国際社会は懸念を示す可能性が非常に高い。他方、新たに加わった使用済み燃料直接処分のオプションによっても、この核不拡散の問題が必ずしも解決される訳ではない。本稿では、原子力政策見直しにおけるプルトニウムの取扱いおよび使用済み燃料の処分に係る核不拡散・核セキュリティ上の課題について整理し、我が国として検討すべき多様なオプションについて核不拡散の観点から議論する。

## I. はじめに

本年9月にエネルギー・環境会議が示した「革新的エネルギー・環境戦略」では、2030年代に原子力発電稼働ゼロを可能とするよう政策資源を投入するとした。これに関し、カリフォルニア大学のJ.Ahn教授は、「出口戦略」<sup>1)</sup>と題して、①出口像の作成と時系列、②原子力利用残存物の後始末、③置き換わるべきエネルギー導入シナリオ、④総合的な影響評価、といった、そこに至るまでのコスト、リスクおよび便益を考えた戦略プランを考えることが必要であり、それらを国民の議論に供することが重要であるとした。政権交代に伴い、原子力発電利用の方向性が修正される可能性が考えられるが、いずれにせよ、今後の原子力発電依存度の低下を想定すれば、出口像の作成や、原子力利用残存物の後始末などに取り組むことが重要であることには変わりない。この観点から、回収されるプルトニウム(Pu)や使用済み燃料(SF)の取扱いは避けられない重要課題であり、安全・核不拡散・核セキュリティ、そしてコストを含め長期的観点から明確な戦略プランを示していくことが求められる。

今回、「革新的エネルギー・環境戦略」では、Puの取扱いに関する部分として「(核不拡散と原子力の平和的利用という)国際的責務を果たしつつ、引き続き従来の方

針に従い再処理事業に取り組みながら、今後、政府として青森県をはじめとする関係自治体や国際社会とコミュニケーションを図りつつ責任を持って議論する」という記述がなされており、具体的な対応については今後の検討に委ねる形となっている。しかし、この核燃料サイクルの継続は、原子力発電ゼロを目指すこととする方向性に対し整合性を欠き、今後核燃料サイクルにより生み出されるPuの明確な対応方向性を示さない限り、米国を含む国際社会は、それを利用目的の明確でないPuの増加と捉え、懸念を示す可能性が極めて高い。

一方、新たに示されたSFの直接処分という選択肢については、SFに多量のPuが含まれているという事実から、その処分場の立地問題などにおいて、これまで以上に困難が予想されると共に、長期的な観点では核不拡散や核セキュリティの確保についても大きな課題が残されることが予想される。我が国の現在の不拡散政策からすれば不整合はないものの、半永久的な保障措置の必要性やSFを地中に埋設することによるPuの半永久的蓄積、すなわち、いわゆるプルトニウム鉱山がグローバル的に生みだされていくという問題を伴うことを意味する。

本稿では、上述の原子力政策見直しにおいて顕在化したリサイクルによるPu及びSF直接処分の取扱いという両者に係る核不拡散・核セキュリティ上の問題(トリレンマ)について整理するとともに、Pu取扱いに対する米国等の政策と今後予想される対日政策などについて考察する。さらに当課題解決に向け、我が国として検討すべき多様な技術オプションについて核不拡散の観点から議論する。

(久野祐輔)

*How to Address Plutonium Trilemma; Solutions for plutonium non-proliferation in Japanese nuclear policy changeover*: Yusuke KUNO, Mitsutoshi SUZUKI, Tsukasa YAMAMURA, Makiko TAZAKI

(2012年 11月20日 受理)

## II. 我が国の原子力政策見直しにおける「再処理継続」および「直接処分」におけるプルトニウムの問題

SFの直接処分の核拡散問題について、先の原子力委員会の原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会での議論では、SF中にはPuとともに核分裂生成物(FP)等が含まれるため、放射線量が高く、また地中へ埋設処分し隔離することで、SFへの人間の接近が困難となることから、核拡散、核セキュリティ面でのリスクは、全量再処理に比べて低いとされた。しかし、「処分」となれば長期的な観点から、核不拡散・核セキュリティのリスクを検討する必要がある。

SFを埋設すれば、地中のPu量は確実に増加し、仮に全量直接処分すれば、21世紀末までのPu埋設量(蓄積量)は、全世界では8,000~10,000トン、日本国内で約1,000トンにもなりかねず、その後も増加し続けることになる。SFは原子炉から取出し後100年を経過すれば放射線及び発熱は徐々に減衰し、300年後には、放射線レベルが十分下がり廃棄体への直接アクセスが可能になるため、核拡散及び核セキュリティ上のリスクが増加する。すなわち、長期的観点からすれば、核不拡散、核セキュリティ上の問題が時間経過とともに深刻化することになる。高レベル放射性廃棄物の地層処分の議論では、一旦定置された廃棄体を回収する余地を残す回収可能性(retrievability)という考え方、及び一旦なされた意志決定を逆戻りさせる余地を残す可逆性(reversibility)という考え方があるが<sup>2)</sup>、SFに同様な考え方を適用した場合、回収可能性を確保することは、長期にわたり、SFへのアクセスを容易にするため、上述のように核不拡散・核セキュリティにも留意していかなければならない。

一方、再処理オプションでは、処理される燃料に含まれるPuは、何らかの形で分離回収されるため、その時点においては核拡散のリスクが増大するが、一定量のPuに注目すれば、そのPu自体は、後に高速炉等において燃焼され消費されることになる。こうした再利用を繰り返した後、核燃料サイクルを伴う原子力利用が終焉する時代には、最終的に廃棄物として残るPuは、非常に少ない量となり、かつ核兵器としては使用困難な低品質なPu(Pu-239の割合が少ない)になると考えられる。

また、小委員会では直接処分の長期にわたる保障措置コストだけが問題視されたが、核不拡散という問題が保障措置だけで解決できる問題でないことは北朝鮮の核兵器不拡散条約(NPT)からの「脱退」のケースをみれば明白である。すなわち、いかなる国家であっても、将来の政策の予測は難しく、核兵器保有の政策に転換する可能性も排除し得ないことを考慮すると、長期的にPuへのアクセスが容易になる直接処分というオプションについては慎重な検討が必要である。

なお、直接処分の保障措置について、IAEAではいまだ方法について結論が得られていないが、少なくともPuが存在する以上、それが自然消失するまで長期(数十万年)にわたり何らかの形で監視やモニタリング等管理を続けなければならないものと思われる。一方、再処理オプションにおける高レベル廃棄物(ガラス固化体)は、保障措置の適用外となる。

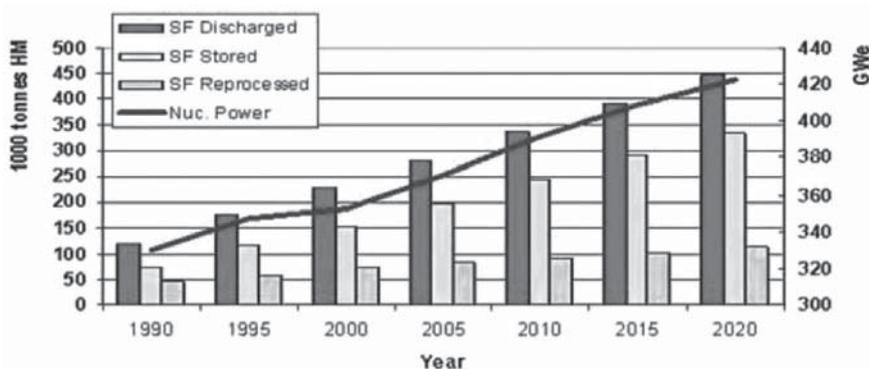
現在、米国でSF直接処分の核拡散リスクを唱える人は多くないものの、以前より他国におけるSF取扱いについての核不拡散上の懸念は高い。2009年に発効した米国とアラブ首長国連邦(UAE)との原子力協定においては、貯蔵や再処理のために使用済燃料を英仏両国へ移転することに対して、あらかじめ米国の同意が与えられている。このことは、UAEが同協定で再処理を放棄することによって使用済燃料の処分のオプションに制約を受けることへの配慮とともに、SFを政治的に不安定な中東に残すことのリスクに対する米国の懸念を示すものであると考えられる。また、かつて1978年から行われた、国際核燃料サイクル評価(INFCE)においては「ワンスルーサイクルにしてもSF中にPuがある以上、長期貯蔵に伴い核拡散の危険が存在し、再処理-Pu利用サイクルに比べて長期的にみて特に核不拡散上優位ではない」との評価がなされている<sup>3)</sup>。

リサイクルオプションでは、六ヶ所再処理工場がフル稼働すれば、さらに毎年最大5トン程度のPuが生産されることになる。また、現在、海外に保有するPuは35トン強あり、国内では9トン強保有されているため(2011年末現在)、今回の政策見直しにおいて、「利用目的のないPuを持たない」との整合性をいかに確保するかという大きな課題が残される。一方、現在の保有量を増加させないようするには、商用軽水炉16~18基でプルサーマルを実施する必要があり、また2030年までに国内外に保有されているものを処理するためには、さらに5~6基の軽水炉でのMOX使用が必要となる(ただし、大間のフルMOX炉が稼働すれば4基弱分の容量のPu消費に相当することになる)。いずれにしても、現在の原子力発電を取り巻く環境に鑑みれば、このような数の原子炉をMOX燃料に利用するという事は容易ではないと言える。

以上、日本の現況に鑑み、バックエンドにおける2つのオプション、すなわちPuを含むSFの直接処分、そしてPu蓄積の可能性のあるリサイクルという両者に係る不拡散問題を示したが、その対処については、第V章において議論する。(久野祐輔, 山村 司)

## III. 米国等の対外的なプルトニウム核不拡散政策と日本への対応

1974年にインドが行った核実験を契機とする核拡散への懸念から、米国はフォード政権の末期以降、他の国によるPu利用を、民生利用も含めて抑制しようとする政



出典：IAEA Nuclear Energy Series, No. NF-T03.5, 43頁

第1図 累積使用済燃料(貯蔵再処理, 1990-2020)

策を一貫してとってきた。特に1977年に登場したカーター政権は核不拡散の政策上の優先順位が高く、多国間協議、二国間の枠組みを利用して他の国のPu利用を抑制しようとした。多国間協議に関しては、米国が主導してINFCEを開催したが既述の結論に至っている(再処理に対する直接処分への優位性はない)。他方、二国間枠組みに関しては、1978年核不拡散法(NNPA)により、米国が締結する二国間原子力協力協定に含むべき、協定締結相手国に対する規制要件を強化、標準化し、NNPAが定める要件に従って、既存の協定を改正するよう相手国に要求した。NNPAに基づき二国間原子力協力協定に規定された、相手国の再処理や形状・内容の変更(MOX燃料の製造等)に関する同意権が、他の国のPu利用に関する米国の事実上の拒否権を担保するものとなった。こうした他の国のPu利用を厳しく制限する米国の政策はカーター政権以降、現在に至るまで続いているが、レーガン政権以降は、政権によるニュアンスの違いはあるものの、西欧諸国と日本のPu利用については、例外的に認める立場をとっている。

日本との関係では、カーター政権当時行われた、旧日米原子力協力協定下での日米再処理交渉によって東海再処理施設の運転が認められたが、処理量、期間に制約を課すものであったことから、将来の見通しが不安定な状況での運転を余儀なくされることとなった。こうした状況は、1988年の新たな日米原子力協力協定の締結により、両国が合意する一定の枠内での再処理等のPu利用に米国が協定締結時点で同意を与える包括的事前同意方式が取り入れられることによって解消された。新協定の締結は、日本の原子力プログラム、特に核燃料サイクル計画が安定的に進められる法的基盤を確立した点において意義が大きい。米国が日本に対してPu利用を認めた最大の理由は、同盟国である日本の核拡散リスクは極めて少ないとする安全保障の観点からの見方があるものと考えられるが、前提として、エネルギー資源が少ない日本による、原子力の潜在的可能性を最大限に活用する核燃料サイクルの確立を目指す政策への理解があったと考

えられる。今回の政策変更により、原子力発電稼働ゼロを目指すとしたことは、この前提が崩れることを意味し、2018年に日米原子力協力協定が30年という当初の期限を迎えるに際し、包括的事前同意の継続的確保を危うくすることにつながる可能性がある。また、米国の核不拡散派=反Pu利用派の間には日本における余剰Puの蓄積に関する懸念が根強くあるため、米国における懸念を増大させることにつながる可能性がある。(山村 司)

#### IV. 世界のSF/Puへの取組みの状況

##### 1. 世界のSFの実態

2010年の世界の年間SF発生量は、約10,500 tHM(重金属)で、そのうち約1割は日本で発生する<sup>4)</sup>。2010年時点での世界のSF累積発生量は約334,500 tHMで、約100,000 tHM(約30%)が再処理され、残りの234,500 tHM(約70%)が原子炉サイト内・外に湿式・乾式貯蔵されている。2020年には、累積SF発生量が約450,000 tHMに達し、うち約25%が再処理、残りの約75%が貯蔵されると見込まれている<sup>5)</sup>(第1図)。

2010年時点で、国内で発生するSFの(民生用)再処理を決定している国は、中国、フランス、インド、日本、ロシア及び英国で、SFの直接処分に向け活動中の国は、フィンランド、スウェーデン、米国、スペイン、ドイツ、カナダ及びベルギーである。米国では、2012年1月に、「米国の原子力の将来に関するブルーリボン委員会」が、ヤッカマウンテンプロジェクトに代わる米国の使用済燃料管理政策に関して提言を発表した。DOEは本提言を受け、6か月以内に使用済燃料管理の戦略を策定することとされていたが、2012年11月末時点で戦略は策定されていない。

##### 2. 試みられたSF及びPuの国際的イニシアティブ

既述のINFCEでは、SFが再処理及び貯蔵容量を上回ることが予想されるためこれを国際的に管理するとの国際SF管理(ISFM)構想の検討を促した。IAEAでの検討では、暫定貯蔵に適した貯蔵技術やSF管理を促す

要因及びIAEAの役割等が明らかにされたが、肝心の貯蔵施設の立地サイトを特定できず実現に至らなかった。1990年代には、マーシャル諸島、パルミラ諸島、ウェーク島、西オーストラリア州等での国際SF・放射性廃棄物の共同貯蔵・管理の提案がなされたが、地元住民や米国、西オーストラリア州の反対で実現しなかった(西オーストラリア州は、これを機に核廃棄物貯蔵禁止法を制定)。2001年のロシアの環境保護法及び原子力法への追記により、ロシア国外で発生したSFの貯蔵・再処理目的での輸入が許可され、ロシア原子力庁がSF管理ビジネスへの参入を表明したが実際のビジネスにはつながっていない。さらに最近の新聞報道によれば日米両国がモンゴルにSFの一時保管・処分場を建設する計画を進めていたが、モンゴル国内での反対運動により断念した<sup>6)</sup>。

総じてSFの貯蔵は、全ての原子炉利用国が直面する問題であり、韓国や台湾など政治や地理的理由で国内での貯蔵が飽和状態にある国も出現しているものの、国際的なSF管理・貯蔵施設は実現していない。

外国で発生したSFの「引き取り」については、東欧諸国のソ連製原子炉や米国起源のHEU利用の研究炉からの、またロシアとイランの二国間原子力協力協定に基づくプシェール原子炉からのSFの引き取りが存在する。しかしこのようなケースは例外であり、SFは発生国がその責任で、再処理あるいは処分を行うことが現状では世界共通の認識であろう<sup>7)</sup>。

一方、民生用Puについては、INFCEにおいて、再処理で抽出されたPuのうち余剰PuをIAEAに預託し国際管理下で貯蔵するという国際Pu貯蔵(IPS)の検討も促された。IAEAにおける検討では、余剰Puの定義、預託するPuの範囲とその返還方法、備蓄の判定条件、Puの使用の検証等で、緩やかな規制を求める発展途上国案と強い規制を求める資源国案、両者の中間に位置する西側先進国案で対立し、三論併記で報告書がまとめられるに留まり、その後の会議は凍結されている。

1994年、冷戦終結に伴う解体核兵器からの余剰Puの発生等に鑑み、Pu利用に係る9カ国(5核兵器国と日、独、スイス及びベルギー)等は、国際Pu管理(IPM)の検討を開始した。1997年に9カ国は、国際Pu指針(INFCIRC/549)を作成し、自国のPu利用政策と民生用Pu(未照射Pu保有量等)と核兵器国にとって防衛目的から不要になったPu保有量がIAEAに報告されるようになった。(田崎真樹子)

## V. 問題解決へのオプション

SFおよびPuの取扱いの問題解決にあたっては、3S(Safety, Security, Safeguards)の観点から、処理・処分について具体的な方向性を示すことが重要である。

SFの取扱については、前述のように、長期的な視点から、将来の世代に核不拡散・核セキュリティに係るリ

スクを残すようなオプションをとるべきではなく、我が国は、世界に率先してPuを含まない廃棄物の処分を目指すべきと考えられる。これについて人間がアクセス困難な地下数kmの深層にSFを埋設すればよいとする考え方(deep borehole)<sup>8)</sup>がある。「Pu 鉱山」にはかわりなく必ずしも核不拡散・セキュリティ上、優れた解決策とは言いがたいものの、Pu回収の物理的・化学的困難性や、廃棄物問題において仮に政治的理由等で地層処分以外に選択肢がないという状況に至る可能性も考慮すれば、否定すべきオプションではないと思われる。ただし、その実現性に関する課題(安全性・経済性核不拡散性等)については十分な議論や研究が必要であろう。

再処理により回収されるPuの利用について、これまで我が国ではエネルギーセキュリティとして推進してきたが、原子力発電依存の低下とともにこれまで通りのPuエネルギー利用政策が継続されるかどうかはいまだ不透明な状況にある。プリンストン大学のHippel教授は、その回収利用について主に経済性から否定している<sup>9)</sup>。確かにPuのコストを再処理費用、MOX燃料製造費用を含めて議論すれば、コスト高となるとしているが、非核兵器国であり、かつ狭い国土という我が国固有の特殊事情から考えれば、再処理オプションは、SF直接処分オプションにおける核不拡散・セキュリティ問題、環境負荷低減など廃棄物問題の解決策とも考えるべきである。以下にリサイクルオプションにおけるPu問題解決についていくつかのオプションについて議論する。

### 1. 蓄積するPuのエネルギー利用

「利用目的のないPuを持たない」との原則におけるPuとは、再処理工場において回収される、MOXを含むPuを指す。そもそも、この原則は、非核兵器国としての我が国が、核不拡散という観点から平和利用の「透明性向上」のために採用した政策であることは言うまでもない。この考え方に立ち返れば、回収されたPuの当面の現実的な消費方法は軽水炉MOX利用(プルサーマル)であり、安全性を最優先させた状態で、多少経済的に不利でもプルサーマルを実施しなければ余剰Puの消費は進まない。ただし、II章でも言及したように、本オプションだけでは我が国のPu問題解決は容易ではない。Puを回収する以上、長期的にはPuバランスが考慮された高速炉利用を目指すことは、今後も放棄すべきでない重要なオプションである。Pu消費を加速させるためには、高速炉により燃焼(消費)していく多重サイクル、マイナーアクチニド(MA)の燃料への添加等によるPu-238、240の増加による核拡散抵抗性の向上など、Pu有効利用を相殺しない形での核不拡散の達成が可能な方法もある。

## 2. バーナー炉の利用

研究開発段階ではあるものの、Pu バーナー炉として、加速器駆動未臨界炉、高速中性子専焼炉等の研究が行われている。Puは原子炉内の燃焼が進めば進むほど核兵器に不向きな品質となる。Puを含む長寿命アクチニド元素の処理による処分場の環境負荷低減等を目的とした加速器駆動核変換システムは、加速器を止めれば連鎖反応が停止する未臨界炉として安全性が高いとされている。燃料関係の研究開発では、蓄積する分離Puを既存の軽水炉で効率的に燃焼させることができる不活性母材燃料の研究が進められており、この一種である岩石型Pu燃料は、我が国においても研究が進められている。

燃焼後に残るPuについては、その品質(同位体組成)をどこまで低下させれば、核不拡散上十分なのかという議論があるが、Pu-238がPu全体の80%を超える場合を除きいまだ結論はなく、Pu廃棄における品質について今後、国際的な議論を進める努力が必要である。こうした議論や関連する研究開発を通し、余剰Puへの将来的な取組みについて、国際社会の理解を求めることも重要である。

## 3. 国際管理

Pu利用が当面進まない場合、SFおよびPuの「貯蔵」というオプションも考えられるはずである。Puについては、MOXの形であれ我が国一国が貯蔵する場合は、将来の平和を謳っても、その実施に対する国際社会の反発は大きいと考えるのが一般的であろう。しかし、その貯蔵が単独国家によるものではなく、多国間で管理するとなれば話は別かもしれない。第IV章で示したように、国際社会はすでに国際Pu管理について二度にわたって議論を行っていることからすれば、その考え方自体は否定されるものではないはずである。前述のように、かつての多国間管理の議論は当時のニーズに必ずしも合致せず実現に至らなかったが、今世紀に入りIAEAを中心に議論が高まり、燃料供給の分野ではあるが既に複数の国際管理の案が実現に至っている。このような状況の変化を考慮すれば、核燃料サイクルの保障措置手法構築に成功した我が国が、SFや回収Puを将来のための資源として厳重な保障措置およびセキュリティのもとで国際管理下に置くという考え方を提案することは、一つの有効なオプションとして考えることができる<sup>10)</sup>。

## 4. Puの廃棄措置

当オプションは、余剰Puを、核拡散抵抗性の高い安全な形で保管、又は処分するものであるが、この場合は、Puをいかに人間にリスクのない形で措置するかが重要な課題となる。Pu保管・処分の方策としては、先に紹介したdeep boreholeの適用がある。これは、米口の戦略核兵器削減条約に基づく核兵器の解体により発生した

Puの処分オプションとして提唱されたものである。分離Puをガラス等固化法により不動態化し、SUSのキャニスタに充填し、高レベル廃棄物と混ぜた後、深層(数km)に処分するものである。埋設物の体積が少ないことから埋設孔の直径が小さくて済み(1m程度)、転用を企てる人間にとってアクセスが困難となるものの、SFに比べ軍事利用的な魅力度が高いため、核拡散のリスクはゼロではなく、優先度的には最も低い手段として考えられるべきものであろう。保障措置的にも大きな問題となる。また安全等課題も多いが、今後米国、英国等、諸外国の動きを注視する必要がある。

以上、現在考えられている代表的なオプションについて示したが、これらのオプションについて最適な組合せとして将来設計をしていくことが重要かつ必要ではないかと考える。  
(鈴木美寿、久野祐輔)

## VI. まとめ

本稿では、新たに示された政策におけるSF直接処分と回収Pu両者に係る核不拡散・セキュリティ上の問題およびその解決にむけた取組みオプションについて議論したが、今後、多様なオプションについて議論を展開していくことが重要であり、それは、9月19日の閣議決定に示されているように「革新的エネルギー・環境戦略」を柔軟性を持って不断の検証と見直しを行うことにもつながる。議論の結果、場合によっては、実効性、実現性の面からV-1節に示したPuの高速炉によるエネルギー利用という考え方が最も有効な選択肢となるかもしれない。いずれにせよ、我が国はSF直接処分や回収Puについて核拡散上・セキュリティ上の問題を回避させるべく、今後取り組むべきオプションを明確にし、国際社会に対し具体的なメッセージを発信していくことが急務であると考えられる。  
(久野祐輔)

### —参考資料—

- 1) Joonhong Ahn: <https://docs.google.com/open?id=0BxD2KJgGRTvPekRBN2NqdTBLVgc> または、岩波書店「科学」2012年6月号(Vol.82 No.6)。
- 2) 「放射性廃棄物の地層処分における可逆性と回収可能性の国際レベルでの考え方」, OECD/NEA, 2001.
- 3) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1980/sb2040301.htm>
- 4) 使用済燃料管理問題と中間貯蔵の重要性—世界の動向、原子力委員会技術等検討小委員会(第8回)資料第3-1号。
- 5) <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/hatukaku/siryoy/siryoy8/siryoy3-1.pdf>
- 6) <http://ndreport.com/mongolia-abandons-nuclear-waste-storage-plans-informs-japan-of-decision/>
- 7) 使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約

- 8) 例えば, Michael Driscoll, A Case for Disposal of Nuclear Waste in Deep Boreholes, MIT 2010.  
 9) F.Von Hippel, *et al.*, *Nature*, Vol.485, 10 May 2012.  
 10) <http://www.flanker.n.t.u-tokyo.ac.jp/modules/security/>

### 著者紹介

久野祐輔(くの・ゆうすけ)  
 日本原子力研究開発機構, 東京大学  
 (専門分野/関心分野)核不拡散技術・政策, 核燃料サイクル,  
 核拡散抵抗性, 保障措置分析, 多国間管理

鈴木美寿(すずき・みつとし)  
 日本原子力研究開発機構  
 (専門分野/関心分野)核不拡散技術, ウラン濃縮技術, 炉物理, 保障措置

山村 司(やまむら・つかさ)  
 日本原子力研究開発機構  
 (専門分野/関心分野)核不拡散政策

田崎真樹子(たざき・まきこ)  
 日本原子力研究開発機構  
 (専門分野/関心分野)核不拡散政策, 多国間管理

## 新刊紹介

### 地層処分 脱原発後に残される科学課題

吉田英一著, 168 p. (2012.11), 近未来社,  
 (定価2,500円) ISBN 978-4-906431-37-3

福島原発事故以降, 今後の原子力エネルギー利用や使用済核燃料の再処理のあり方について活発な議論が行われている。しかしながら, どのような選択がなされようとも, 放射性廃棄物は現在すでに存在し, また, 近い将来に廃棄物となる潜在的廃棄物も確実に存在する。これらの安全, 確実に合理的な処分を進めることは現世代の責務である。ここで, 日本の地質環境は「変動帯」と呼ばれる火山, 地震, 隆起, 沈降などが活発な地帯にあるが, このような地質環境において数万年の長期にわたる廃棄物の地層処分は可能なのか? との本質的な疑問が湧出する。その答えは簡単に導き出せるものではないが, 一方で, Yes/No の二者択一式の稚拙な判断を行ってはならない。最善の判断を導くための要点は, 最終的な判断に至る論理を構築していくプロセスそのものにある。そのための科学的知見を鋭意積み重ねていく事こそが現在の研究者, 技術者がなすべき使命である。本書は, このような考えの基に, 地層処分の技術的な可能性について, これまでの多

くの科学的知見を客観的に総括し, さらに今後の課題について議論したものである。

放射性廃棄物の地層処分は様々な専門分野の技術を統合して成り立つ総合工学である。本書では, 主に著者の専門分野である地質学, 地球化学, 鉱物学の観点から地層処分の可能性が議論されるが, 土木工学, 放射化学, 材料学など他分野の多岐にわたる豊富な知見も交えて, 真に総合的な観点からの解説と議論が進められる。まず初めに, 様々な候補の中から地層処分が選定された経緯が示され, 続いて, 地層処分に求められる地質要件, 地質環境のバリア機能とその長期安定性へと話が展開する。その内容は, 具体的かつ丁寧な説明によって地質, 鉱物学を専門としない読者にも明快な理解が可能である。また, 最終章において「残された科学課題」が議論され, ここで著者は「日本独自の地下環境 (Japan specific) の理解」と「多岐にわたる専門分野の分野横断的な連携」の必要性に言及する。さらには「分野と世代を超えた科学者集団による認識共同体の形成」の必要性に迫る。地層処分を様々な観点から真に総合的に理解, 判断する上で格好の選書である。 (九州大学・稲垣 八穂広)





# ICRP の最新動向と福島事故対応

## 第27回原安協シンポジウムより

放射線医学総合研究所 酒井 一夫

2012年11月5日に開催された第27回原子力安全研究シンポジウムにおいて、ICRP(国際放射線防護委員会)の科学事務局長と専門委員会・委員長からICRPの最近の活動状況、特に福島事故後の取組みについて概要が紹介された。ICRPは事故後福島にて公開対話集会を開催するなど、福島事故に積極的に関わっている。ICRPに蓄積されている経験(特にチェルノブイリ事故後の実績)は、福島事故後の復旧・復興に大いに役立つものと思われる。一方、福島事故はICRPが提唱してきた放射線防護の考え方の妥当性が検証される機会でもある。ICRPでは、日本における活動を通して得られた情報を含めて、「福島事故からの教訓」を取りまとめつつある。今後、わが国からの情報提供を含めた継続的な情報共有が放射線防護体系の一層の進展に資するものと考えられる。

### 1. はじめに

国際放射線防護委員会(ICRP)が、科学的な情報に基づいて放射線防護の基本的な枠組みを勧告し、国際的に重要な役割を果たしていることは周知の通りである。ICRPは東京電力福島第一原子力発電所事故に放射線防護の観点から積極的に関与している。事故後、2011年3月21日には、“Fukushima Nuclear Power Plant Accident”と題したメッセージ<sup>1)</sup>をウェブ上で発表した。

内容としては、緊急時(緊急時被ばく状況)および復旧時(現存被ばく状況)における放射線防護の考え方についての確認であり、特に新しいことが含まれているわけではない。しかしながら、ICRPが個別の事案に対して声明を出すことは異例のことである。2012年3月12日には“One Year Anniversary of the North-eastern Japan Earthquake, Tsunami and Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident”と題したメッセージ<sup>2)</sup>を発表し、ICRPとして今後も積極的に事故からの復旧に関与するとの意向を表明している。その一環として、2012年10月25日から11月2日にかけてICRPの勧告の最終的な取りまとめを担当する「主委員会」(第1図参照)の会合が福島で開催された。この会合に参加するために来日したICRP科学事務局長のChris Clement氏と第4専門委員会委員長Jacques Lochard氏を原子力安全研究協会が招待し、第27回原安協シンポジウムとして、ICRPの最新動向と福島事故対応についての講演会が実現した。

### 2. ICRPの最近の活動(Clement氏)

#### (1) ICRPの組織

ICRPは国際的な拘束力を持つ組織ではない。委員は

各国の代表ではなく、個人の資格で参画している。英国医学会の中の非営利団体という位置付けではあるが、その歴史と実績を背景として権威ある組織として認められており、ICRPの提案する放射線防護の枠組みは多くの国の放射線管理にかかる法令等の基盤とされている。

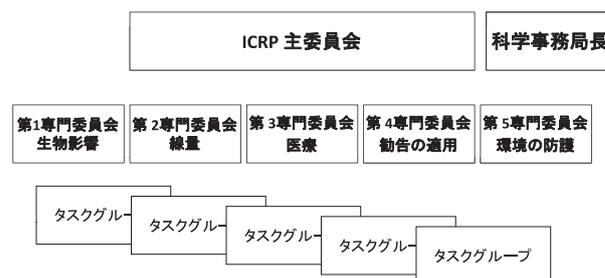
ICRPでは、何年かごとに放射線防護の基本的な考え方に関する「主勧告」を発表している。最新の主勧告はPublication 103として2007年に公表されている(ちなみにICRPからの報告書はPublicationと称され、1959年に発表された主勧告以降、通し番号が付されている)。

ICRPでは、主委員会の下に、5つの専門委員会が設置されており、それぞれ生物影響、線量概念、医療被ばく、勧告の適用、環境の防護を担当している。さらに各専門委員会にはタスクグループが組織され、個別の報告書の作成作業を進めている(第1図)。タスクグループを含めると、現在33カ国240名を超える専門家が参画している。

#### (2) ICRPのミッション

放射線防護のあらゆる側面に対する勧告や指針を通じて、放射線防護の進展に寄与し、公衆の恩恵に資することが、ICRPのミッションである。

主勧告を含めて、ICRPからの報告書およびそこに含まれる勧告は「人々および環境に対して、放射線に関連



第1図 ICRP組織図

Recent Activities of ICRP, Including Those after the Fukushima Accident : Kazuo SAKAI.

(2012年12月7日受理)

した人の望ましい行為を不当に制限することなく、人々と環境を放射線の有害な影響から防護する」ことを目的としている。

### (3) 2011年から2017年のICRPの行動方針と実施方策

#### (1) ICRP勧告をより広く浸透させる。

このために、ICRPの刊行物を低価格であるいは無償で配布することを目指す。また、ICRP構成員以外も対象とするICRPシンポジウムを開催する。

#### (2) 放射線防護の一層の展開の基礎となる科学的情報を収集する。

科学的情報の進展に目を配り、放射線防護体系の進歩に資するかどうかを評価するとともに、放射線防護の展開に資する研究課題の推進を勧告する。

#### (3) 医学の分野で放射線防護の考え方を周知させる。

このために、医療関係を含めた関連組織との積極的な連携を図る。

#### (4) 環境の防護への関心と必要性の高まりを受けて、放射線防護の枠組みの中に環境の防護を適切に位置づける。

#### (5) 放射線防護に関心を持つ組織・機関との積極的な連携を進める。

UNSCEAR(原子放射線による影響に関する国連科学委員会)、OECD/NEA・CRPPH(経済協力開発機構/原子力機関・放射線防護公衆衛生委員会)、IRPA(国際放射線防護学会)等と積極的に連携を図る。

#### (6) 新規委員の選任はオープンにするなど、運営全般につき一層の改善を図る。

### (4) ICRPシンポジウム

ICRPの活動およびその成果を広く周知させるための試みとして「放射線防護の国際的枠組みに関するICRPシンポジウム」が企画された。第1回は2011年10月24～26日に米国ベセスダにて開催された。参加者は35か国から約400名を数え、成功裏に終了した。なお、このシンポジウムの報文集は、Annals of ICRP 41(3-4)、2012として刊行されている。

第2回のシンポジウムはアラブ首長国連邦アブダビで2013年10月22日から24日にかけて開催の予定。

### 3. 福島事故後のICRPの活動(Lochard氏)

#### (1) 主委員会および関連会合

通常的主委員会としての議事(各専門委員会の活動状況および刊行物の準備状況、並びに今後の活動計画の討議等)に加えて、10月30日には伊達市の農産物のセシウム検査施設を、また11月1日には福島市にある除染情報プラザ<sup>3)</sup>を訪れた。11月2日には福島医科大学においてICRP-福島医大共同主催セミナーを開催した。さらに、

11月3日には環境省主催の「福島原発事故による長期影響地域の生活回復のための福島県民と国際的な専門家との対話集会」に協力した。

### (2) 情報共有のための公開対話集会

#### (1) 対話集会で提供されたチェルノブイリ事故後の経験

福島における放射線防護の側面からの今後の対応を検討する上では、チェルノブイリ事故後の経験が有用と考えられる。

- ・放射性物質で汚染されている土地に居住することは、放射線レベル以外にも様々な日常的な課題を伴う。
- ・放射線モニタリングや住民の健康チェックは、当局が実施すべきであるが、住民の協力も重要。
- ・住民が自ら行う放射線防護施策についても、住民任せではなく、当局の支援および住民との情報共有が必要。
- ・対話する場が必要であり、あらゆるステークホルダーが参加すべき。また、専門家と住民が共通の価値観を持つことが重要。

- (2) 福島の現状を共有するための公開対話集会の実施
- |     |                     |         |
|-----|---------------------|---------|
| 第1回 | 2011年11月26～27日(福島市) | 参加者約30名 |
| 第2回 | 2012年2月25～26日(伊達市)  | 参加者約60名 |
| 第3回 | 2012年7月7～8日(伊達市)    | 参加者約60名 |
| 第4回 | 2012年11月10～11日(伊達市) |         |
- (原安協シンポジウム開催時には未実施であったが、その後、約60名の参加を得て、予定通り実施された。)

対話集会には、地元住民や行政担当者が参加し、ICRPをはじめとする国際組織が進行役やアドバイザーとして加わった。また、集会用の様子はメディアに公開された。

#### (3) 対話集会での意見

- ・住民が事故後の状況についての情報を理解し、その上で被ばく線量の低減方策をとることができるような「放射線防護文化」を醸成することが重要。
- ・被ばく低減に資するために、放射線レベルの状況に関する情報を共有することが重要
- ・若い世代が農業を放棄し、県を去ることによる高齢化が大きな懸念事項。
- ・影響を受けた地域の人々、特に結婚前の世代の結婚と出産に関する差別が重大な問題。
- ・山菜の収穫は伝統であり、文化。これを維持することが福島のコミュニティにとって重要。

#### (4) 対話集会からの提言

- ・地元コミュニティや住民からの、住環境改善への提案を支援する仕組みの構築。
- ・コミュニティ特有の事情を反映し、地元の優先順位を反映させた復旧活動に対する支援。

- ・住民が自らの被ばく線量をモニタできるような情報と用具の提供。
- ・子どもの放射線防護文化醸成へ向けた両親や教育関係者への呼びかけ。

#### (5) 福島事故からの教訓の取りまとめ

福島原発事故は、ICRP が提唱し勧告してきた放射線防護体系の妥当性を検証する機会である。対話集会の中で得られた住民の生の声を含めて、ICRP の勧告がどのように役に立ったか、改善すべき点がなかったかなどを検証し、報告書「福島事故の教訓」の取りまとめを進めている。今後、これを基に放射線防護体系の改善へ向けての方向性が議論されることとなる。

(筆者注：「福島事故の教訓」はその後、11月22日に「日本における原子力発電所事故の教訓とICRPの放射線防護体系」と題してICRPのウェブページに公開された<sup>4)</sup>)

#### 4. 質疑応答から

Q：放射線の影響に関して住民と専門家の対話が大事とのことだが、放射線の専門家の間でも放射線のリスクについて見解が分かっているのではないか。

A：科学的根拠に基づいていない意見は論外として、個別の論文をみると、放射線のリスクを高く評価する報告も、低く評価する報告も見られる。学界で国際的なコンセンサスが認められたものがICRPの勧告の基礎となっている。

Q：対話集会から得た感触を伺いたい。

A：住民の方が自身で既に答えを持っていて、専門家からの「安全」とか「安全でない」というお墨付きをもらいたい、と考えている場合が少なくないと感じた。ただし、その判断の根拠となっている情報がメディアやウェブ上にあふれている。いい加減な情報である場合もあり、科学的に適切な情報の提供が大前提として重要と思う。

一方で、先祖代々の土地を離れて新たな生活を始めるという重大な決断を、放射線レベルだけに基づいて下すことが適切かどうかについては考えさせられる。必要な情報の提供という前提のもとで、住民の方々自らに、自分の置かれている現実に向き合ってもらうことが重要と考える。

Q：福島事故後の日本政府の緊急時対応についてどう思うか

A：ICRPの勧告には、被ばくの低減、移住、食品の制限などが必要と書いてあるが、「この方策で万全」というような単純明快な解はない。状況ごとに判断は異なる。実害とベネフィットを勘案して、それぞれの状況に応じて判断する必要がある。

避難に関しても、チェルノブイリの場合は旧ソ連の体制下で、国有地から国有地への移動であったが、日本の場合はそうではない難しさもある。

食品に関しては、チェルノブイリ事故の際には、情報が提供されない中で子どもたちが高濃度に汚染されたミルクを摂取してしまった。この点に関して日本の対応は早く、このようなことは起こらなかった。

#### 5. おわりに

近年ICRPには、より開かれた組織を目指す姿勢が見られる。特に、福島原発事故以降はこの動きがはっきりと認められる。福島事故からの復旧にあたっては、ICRPの中に蓄積されている経験が有用であろう。それと同時に、福島事故はICRPの提唱してきた放射線防護の枠組みに対する大きな挑戦でもある。Lochard氏の講演の中でも触れられているが、ICRPでは「福島事故からの教訓」という報告書を取りまとめている。今後も、福島復興にあたって、放射線防護の観点からの課題や問題点をICRPに提供することが、より合理的な、より現実に即した放射線防護体系の構築に資するものと考えられる。この意味で一つのきっかけとなるシンポジウムであった。

#### —参考情報—

- 1) <http://www.icrp.org/docs/Fukushima%20Nuclear%20Power%20Plant%20Accident.pdf>
- 2) <http://www.icrp.org/docs/Fukushima%20One%20Year%20Anniversary%20Message.pdf>
- 3) <http://josen-plaza.env.go.jp/>
- 4) <http://www.icrp.org/docs/ICRP%20TG84%20Summary%20Report.pdf>

#### 著者紹介



酒井一夫(さかい・かずお)  
放射線医学総合研究所  
(関心分野)放射線防護の基礎としての放射線生物学。特に低線量・低線量率放射線の生物影響



## 組織や専門分野を超えた若手交流の意義 原子力若手討論会報告

YGN 運営委員 永田 章人(株東芝), 後藤 弘行(関西電力株)

原子力青年ネットワーク連絡会(以下、「YGN」という)は2012年6月1日に「原子力若手討論会」を開催した。討論会では、若手同士が現在の原子力を取り巻く問題や将来像について議論し、互いに刺激しあい、将来に向けた動機を得た様子がみられた。一方で、現在の原子力業界における組織間・分野間の交流の不足が感じられ、今後も職種や専門性にとらわれない幅広い若手交流の必要性が再認識された。

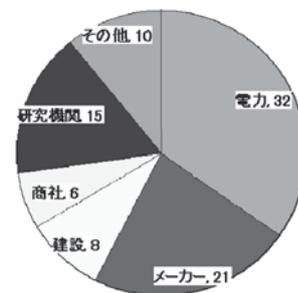
### 1. 緒言

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震を端緒として発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故(以下、「1F事故」という)により、原子力の安全や利用に対する国民の信頼が失われ、原子力発電を取り巻く社会環境は大きく変化した。現在、1F事故後の環境修復や今後の安全規制、研究開発、人材育成等の将来の原子力利用のあり方について、政府や業界の関係者のみならず、公衆においても多くの議論がなされている。これらの原子力の将来に関する議論は、それを担う原子力業界の若手世代の将来そのものに関するものであることから、YGNでは、若手が自ら真剣に考えなければならない課題と考え、原子力人材育成ネットワーク実務段階分科会の協力の下、2012年6月1日に東京都内で「原子力若手討論会」を開催した。

### 2. 原子力若手討論会の開催

原子力若手討論会では、原子力業界で働く若手世代で集まり、原子力業界の現状や今後の課題について議論することを目指した。特に、若手一人一人が、それぞれの所属組織での業務などにおいて感じる疑問や矛盾等を本音で話し、その背景や改善策等も含めて議論することで、専門分野を超えて視野を広げ、問題意識を共有し、将来の原子力産業とそれに携わる自分自身について考えるきっかけを得ることができるのではないかと考えた。

幅広い組織や職種からの参加者を募るため、日本国内の原子力に関連する企業や団体に所属する若手(原則、35歳以下)であれば、専門分野や職種によらず参加可能とした。YGNからの直接の告示・案内のほか、原子力人材育成ネットワークの協力も得て、各企業・団体への周知も行い、その結果、電力、メーカー、建設、研究機関、



第1図 原子力若手討論会 所属別参加者数

商社、官公庁等、33の企業・団体に所属する92名を募ることができた(第1図)。

討論会の議題について、討論会開催のきっかけである「原子力の将来を若手自ら思考する」こと、幅広い分野の若手が共通して意見が交わせるように、「エネルギー政策」、「核燃料サイクル」、「安全性の向上」、「人材育成」、「地域共生」、「国際貢献」の6つのテーマを設定した。討論会では、初めにYGNメンバーでパネルディスカッションを実施した後、テーマ毎に10人程度のグループに分かれて討論した。各グループでは、それぞれのテーマに関連して、参加者が日々の業務等を通じて感じている問題点や疑問等について紹介し合い、それらについて原因、背景、解決策を中心に議論した。なお、参加者は職種も専門性も異なる初対面同士であることを踏まえ、活発な議論を促すために、事前のアンケートに基づいて、関心分野が近く、所属組織が異なる者でグループを構成した。また討論会当日は「チャタムハウスルール」(会議で得られた情報は、参加者個人の責任の下で利用することができるが、発言者の氏名や所属等については秘匿する義務を負う)を適用し、関係者以外(マスメディアを含む)の立入りを禁止するなど、参加者が所属組織にとらわれず、個人として本音で話すことができるような環境づくりを行った。グループ討論の結果は、参加者全員の前で発表し、質疑応答を行った。

グループ討論は、終始活発な雰囲気で行われた

*The Importance of Youth Interaction among Various Organizations and Specialities*: Akito NAGATA, Hiroyuki GOTO.

(2012年12月3日 受理)



第2図 グループ討論の様子

(第2図)。参加者の専門分野や職種が様々なため、専門用語や慣習等について補足が必要となる場面もあったが、幅広い討論が行われ、ユニークなアイデアも見られた。以下に、その一部を紹介する。

#### エネルギー問題

- ・原子力業界内に限定した議論では、原子力を推進すべき、といった論調になりがち。エネルギー政策の一つの選択肢として、他のエネルギー源も含めて、科学的な情報に基づき、どの技術にどの程度投資をすべきか、という議論が必要。

#### 核燃料サイクル

- ・長期エネルギー源としての可能性(メリット)があると考えるなら、現原子力利用世代が道筋をつけるべき。

#### 安全性の向上

- ・まずあるべき姿は、事業者の自主的な安全性向上であり、規制当局も技術力を高め、適切に監視できる体制を構築することが、事業者の取組を効果的にし、かつ客観性を持たせるために不可欠。また事業者の努力義務に委ねるべきものと、国や自治体が担うべきものを整理し、安全に対する責任を明確化すべき。
- ・情報発信のあり方として、安全性や安全対策の結果だけでなく、検討の過程等(選択オプションと決定理由)についても、発信してはどうか。

#### 人材育成

- ・学生や若い世代の原子力離れが進むと予想される中、原子力に対し夢や責任感を持っている若手世代が、より若い世代に対して動機付けできるのでは。
- ・大学教育の仕事へのフィードバックを高めるために、産業界のニーズを踏まえた大学教育もしくは研修機関を新設したらどうか。

#### 地域共生

- ・立地地域からの信頼は、そこで働く技術者が一人の人間として信用されているかどうかによるところが大きい。その意識を持って、自立、自己研鑽、誠実さ等、人間性を高めるべき。

#### 国際協力

- ・日本は、設計・製作技術・運転実績に加え、核不拡散分野での国際貢献もあり、今後、原子力の導入を希望している途上国から、大きな期待を寄せられている。これらの国際社会からの期待に応えることを、日本の技術者の使命として忘れてはならない。

#### 3. 参加者のアンケート結果

本討論会終了後、参加者に対して満足度や改善要望等についてアンケート調査を行った。

この結果、参加者の95%が若手討論会に満足と回答(とても満足:50%、まあまあ満足:45%)し、参加者全員が今後も継続すべきと回答するなど、開催前の予想を上回る好評を得た。これらの回答と共にコメントされた意見は、主に以下のとおりである(第3図)。

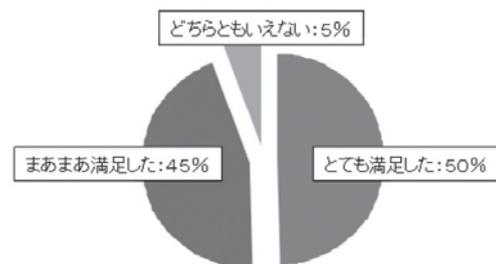
- ・普段接することのない他業種の人から、多様な意見を聴くことができ、自らの視野を広げる良い機会であった。
- ・同年代の方の意見を聴き、大変よい刺激を受けた。
- ・貴重な異業種間交流の場である。
- ・今こそ若手が、社会への働きかけを含めて、恐れず積極的に活動していくときだと感じた。

これらの回答から、参加者の視野を広げ、問題意識を共有し、将来にむけて意識を高揚させるという討論会の目的は十分に達成し、更に組織を超えた若手間の人脈作りにも貢献できたのではないかと考えられる。

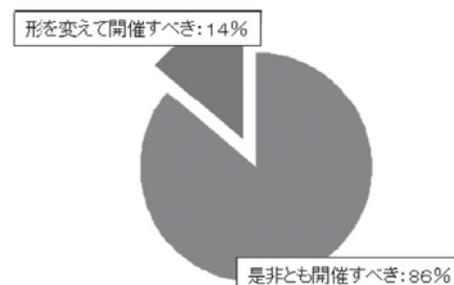
また、参加者の所属組織からも、以下のようなコメントを頂戴することができたことから、人材育成等の観点からも意義のある企画であったと思われる。

- ・若い時期になかなか経験できないため、機会を増や

#### ①本日の討論会の満足度と、その理由を教えてください。



#### ②この若手討論会を、今後も継続的に開催すべきだと思いますか？



第3図 参加者アンケートの結果

すことで業界全体のモチベーションアップになるのではないかと。

- ・これからの時代を担う若い世代に原子力の特質, 長所を十分に腹入れしてもらい, 自信と誇りを持って原子力開発を強力に推進してもらうには時宜を得た企画である。
- ・自身の思考を整理して参加し, 同世代の若手とまじめに自由に議論することにより考え方を共有する良い機会となり, 人材育成上の意義がある。

一方で, 改善提案としては, 「討論時間が不足している」「1日あるいは合宿形式も検討してはどうか」等, より時間をかけた密な討論を希望する声や, 「地域再生についても議論が必要」「マスコミなど他の業界も巻き込んだ討論会があると有意義」等, 討論テーマや参加者の多様化を求める声が多く聞かれた。また一部からは, 「議論するだけではなく, 今後のアクションプランを作成し, 具体的活動へつなげたい」というような, より積極的な提案も出された。

#### 4. 考察

討論会に対し, 参加者及び参加者の所属機関から好意的な意見が聞かれたが, これらの意見の背景として, 若手の現状として, 以下の課題があると考えられる。

- ・多くの若手が, もっと自分の考えや感性を, 他人と共有し, 深く議論したいと感じているのではないかと。
- ・同じ原子力業界内であっても, 所属組織を超えた交流や, 自分の専門分野以外の分野との接点が少なく, 議論する機会がないのではないかと。

今後の原子力の見通しが不透明な中で, 原子力の現場では社員のモチベーション低下や若手や学生の業界離れの深刻化が懸念されており, このような課題は喫緊に対応すべき事項であると考えられる。一方, 今回の討論会では, 各個人が自らの将来像を描き, 使命感を抱いている様子や, それらを議論することで, 互いに刺激しあっている様子がみられた。このことから, 同世代同士で組織や分野を超えて議論することで, それぞれの考えを洗練させるのみならず, 個人のモチベーションを向上させることに効果があるのではないかと考える。このような活動を継続的にを行い, より多くの若手を巻き込むことで, 業界全体のモチベーションを向上させ, 一体感や活力を与え, ひいては将来の安全性確保・向上と原子力業界の再興へとつながるのではないかと考える。

#### 5. 今後の展開

前項のとおり, YGNでは今回のような組織や専門分野を超えた若手同士の討論会を継続開催すべきと考えて

いる。特に, 今回の若手討論会では, 視野の拡大やモチベーション向上, 人脈形成に有効であったとの意見があったことから, 特にこれらの観点から, より効果的な企画になるよう, 例えば, 世界原子力大学やIAEAマネジメントスクールといった, 国や専門を超えた若手を対象とした実績のある研修などを参考に工夫, 改善, または新しい企画を開催したいと考えている。

今回の若手討論会での意見は, 2012年秋の大会企画セッション「若手で語ろう!我々の目指す原子力の姿とは?」にて報告した。そこでは会場の参加者を交えて, 安全性の向上や社会からの信頼回復について, 若手自身がどのように成長すべきかについて意見交換を行い, 「『原発ゼロ』が現実味を帯びる中, 危機感を持って技術の習得や人材の育成をすべき」, 「原子力業界と一般社会との間での信頼関係構築には, 専門分野を超えたコミュニケーション能力が必要」, 「技術・マネジメント・コミュニケーションについて, 各個人の特性を把握して伸ばすことが大切である」といった意見が出された。

YGNでは, 従来から原子力業界全体の活性化を目的とした研究会や人材交流企画を開催している。また, 今回の原子力若手討論会のほか, 高レベル廃棄物の地層処分や次世代炉に関する研究会, 学生連絡会等と共同で学生との意見交換会なども実施している。若手討論会は, その人数規模や所属組織や専門分野の多様性の観点から初の試みであったが, 参加した若手の感想や意見から, 参加者の啓発や交流等に高い効果があったと考えている。今回, 原子力若手討論会や秋の大会企画セッションで得られた意見は, 今後の各企画へ反映し, YGNの活動をより有意義なものとしたい。そして今後もYGNの特徴を生かして原子力業界の発展に資する活動を展開していくことが重要と考えている。

最後に, 今回, 原子力若手討論会の開催に大変なご助力を賜った原子力人材育成ネットワーク実務段階分科会の方々に感謝, 御礼申し上げます。

#### 著者紹介



永田章人(ながた・あきと)  
YGN 運営委員・(株)東芝  
(関心分野/専門分野)小型高速炉の炉心設計



後藤弘行(ごとう・ひろゆき)  
YGN 運営委員・関西電力(株)  
(関心分野/専門分野)原子力発電所の運転管理

連載  
講座これからの原子力システムを担う  
新原子力材料

次世代原子力システムのための材料開発の現状と課題

## 第6回 機能材料(増殖・増倍材料を含む)

日本原子力研究開発機構 中道 勝, 星野 毅, 東北大学 四竈樹男

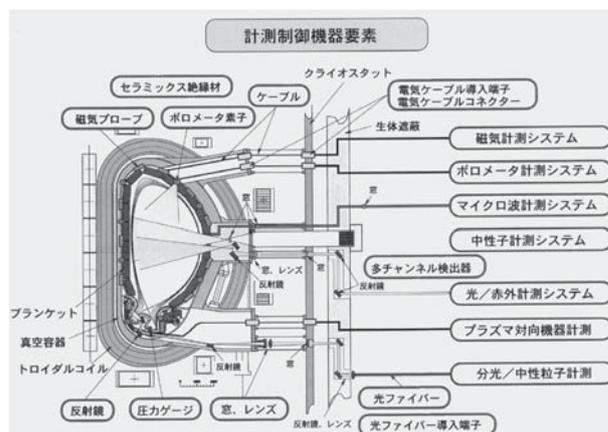
機能性材料は必ずしも厳密に定義できる語彙ではない。本稿では、核融合炉の構造健全性を確保する構造材料に対比する形で、強度などの機械的特性以外の特性(機能特性)を積極的に利用する材料として、プラズマ診断、環境診断に関連した計測機能材料、トリチウム増殖材料、ならびに中性子増倍材料など、核融合システムにとって極めて重要な広義の機能性材料について概説する。

## I. 計測機能材料

## 1. 概要

核融合システムでは、燃焼プラズマ計測制御を中心として、核反応状況を的確に把握することが不可欠である。そのため、光学的、電磁氣的、熱的測定が必要で、測定用の窓、センサー、信号伝送システムが必要となる(第1図)。プラズマ診断では、特に紫外から近赤外までの光計測が重要で、そのための光学系窓、センサー、ファイバ等は重要である。また、核融合炉は多くの電磁気系で構成されるため、電気絶縁材料は極めて重要で、主にアルミナ( $Al_2O_3$ )等のセラミックスより構成される。材料としてのセラミックスに関しては、Kingeryらによる名著『セラミックス材料科学入門(基礎編, 応用編)』<sup>1)</sup>がある。

一般的に、機能性材料は放射線の影響で材料特性が大きく変化するが、いかに放射線の影響を低減してこれらの材料を使うかが工学的に重要な課題である。国際熱核融合実験炉ITERの工学設計で山本<sup>2)</sup>がプラズマ診断用機能性材料に対する放射線の効果(照射効果)を、セラミックスの照射効果全般に関してHodgsonとShikama<sup>3)</sup>がまとめている。セラミックスの照射効果に関し、一般的な金属系材料に対する照射効果と対比しつつ述べる。

第1図 核融合システムに必要な計測機器<sup>2)</sup>

## 2. セラミックスに対する照射効果

照射効果は、電子励起効果、原子はじき出し効果と核変換効果からなる。金属では電子励起効果は加熱効果のみだが、セラミックスでは機能特性を大きく変えるだけでなく、ラジオリシス(放射線分解)現象を通じて原子はじき出し効果と同様の構造変化を生じる。ラジオリシス現象はシリカ等の共有性が強い結晶で顕著に現れる。アルミナはラジオリシス現象が生じないと考えられるが、強電場下で電気分解をアシストする形でラジオリシス現象が現れる<sup>3)</sup>。核融合炉では、電子励起を生じる効果は原子はじき出しに対して10~10,000倍程度であり、ラジオリシス効果に敏感な材料は永久的な構造変化を生じやすい。光学材料の単結晶アルミナとシリカガラスを比較した場合、シリカガラスの方が扱いやすく、大型製造に適しているが、ガンマ線等の電子励起により着色し、ラジオリシスにより容易に構造変化する。

原子はじき出し効果では、セラミックスは金属とほぼ同じだが、稠密構造の金属に比べて隙間があり、主に軽

Materials for New Generation Nuclear Energy Systems—  
Current State and Future Agenda for Material  
Developments(5); Functional Materials including Breeder  
and Multiplier: Masaru NAKAMICHI, Tsuyoshi HOSHINO,  
Tatsuo SHIKAMA.

(2012年 9月4日 受理)

■前回のタイトル

第5回 VおよびW合金

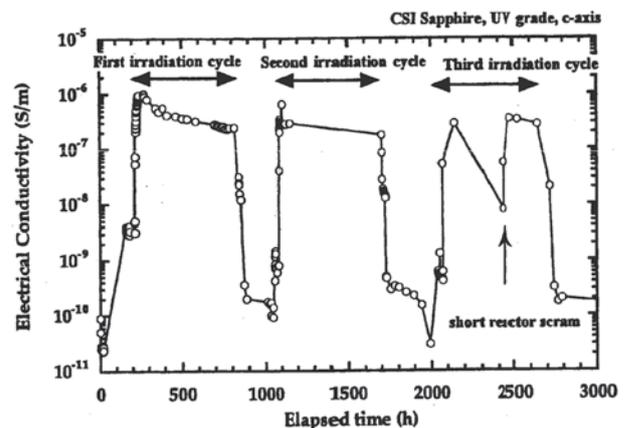
元素で構成されるため、はじき出しのカスケード構造が比較的粗になり、小さなサブカスケードに分かれる。このため、中性子エネルギースペクトル依存性が比較的小さく、一般論的に核分裂炉と核融合炉での相違は小さい。一方、多元系セラミックスは、構成元素間のクーロン相互作用が強く、局所的な結合方向が決められており、化学量論組成を局所的に維持することなどから、空孔等の欠陥が存在し、それらの複合欠陥構造が複雑になる。この結果、10 dpa 以上の重照射による微細組織変化は金属とは異なる。また、セラミックスは塑性変形が小さいため、照射による寸法変化が亀裂生成につながる。特に、アルミナ等の異方構造材は、数 dpa 以上で粒界での亀裂生成(粒界剥離)が生じ、これが材料寿命を決める。耐照射性セラミックスは、化学量論組成制御や結晶構造制御など多様な手法を利用した試みの結果、照射脆化や寸法変化等の材料劣化が小さく、100 dpa を越す材料寿命が想定される材料として開発されている。一例では  $MgAl_2O_4$  のような構造空孔や構造空隙を持つスピネル系材料やイットリウム添加により等方性構造を実現し、構造空孔を導入したイットリウム安定化ジルコニア(YSZ)等がある<sup>4)</sup>。

核変換効果では、酸素等のセラミックス主要構成元素の軽元素の(n,  $\alpha$ )、(n, p) 反応(ヘリウムや水素生成反応)が、10 MeV 程度から反応断面積が非常に大きくなるガス核変換効果が重要である。計算では、14.1 MeV の高エネルギー核融合中性子にさらされる部位で、セラミックス中に dpa 当たり数1,000 ppm 以上のガス元素が生成する。核変換によるガス元素生成は、上述の原子のはじき出し効果等による微細組織変化に影響を与え、ガス元素が存在しない場合に良好な耐照射特性を示すセラミックスでも体積膨張(スエリング)等の大きな組織・寸法変化を生じる。また、アルミナ等、比較的にスエリングに耐性を持つ絶縁材料においても、ガス核変換に伴う場合にはある程度スエリングが生じるが、これは軽元素に本源的な問題であり、解決策は見出されていない。

一方、照射効果はフェムト秒の単位で生ずる放射線と材料構成元素との相互作用から、数十年規模の構造変化に至るまでの幅広い時間依存性を持つ。金属では一部を除き、ある時間経過後に、照射効果による微細構造変化に起因して材料特性が変化するのに対し、セラミックスでは極短時間で起きる単寿命の励起欠陥(例えば電子励起による電子欠陥)によりその特性が動的に変化する。この変化は基本的に照射中にのみ観測され、照射が終わるとある程度の遷移期間(通常は数秒以下)を経て元の状態に戻る。これを金属における恒久的な照射効果、積算照射効果に対比させて、動的照射効果と呼ぶ。典型的な動的照射効果としては、照射誘起電気伝導、照射誘起発光、照射誘起電損失等が挙げられる。

第2図に米国オークリッジ国立研究所の高出力密度原子炉 HFIR で照射中のアルミナの電気伝導度変化を示す。室温のアルミナの電気伝導度は  $10^{-17} \sim 10^{-13} S/m$  であるのに対し、原子炉停止時のガンマ線束が  $0.1 Gy/s$  (36 kR/h 程度) 以下では  $10^{-11} S/m$  程度の電気伝導度(絶縁抵抗  $10^6 \Omega/m$  で通常の絶縁材料ではほぼ  $1 G\Omega$  を越す電気抵抗に相当する)となり、さらに原子炉稼働中は  $10^{-7} S/m$  を上回る電気伝導度を持つことになる。この動的照射効果に関しては、電子励起効果を抑制する手段として不純物添加、例としてアルミナへのクロム酸化物の添加が提案されているが、核融合環境下の高レベル電子励起状態ではむしろ逆効果であり、極力、高純度の材料使用が推奨されている。

照射誘起発光は照射中にセラミックスが光る現象で、これを用いた放射線計測がシンチレータである。多くのセラミックスは紫外から近赤外にかけて発光する。溶融シリカも強い照射誘起発光を紫外から可視領域で持つ。第3図に原子力機構材料試験炉 JMTR で照射中における、添加元素等を変えた各種溶融シリカ光ファイバに白色光を入力した時の、出力光の色を示す。赤色への変色は、短波長の可視領域(青に近い部分)が照射効果により吸収されたことによる。また、青みがかかった着色の原因は450 nm 付近の強い照射誘起白光と、300 nm 付近から近赤外にかけてのチェレンコフ発光に起因する。これら着色は光信号を歪め、さらには信号強度そのものを低下させるため、実用上大きな問題となる。



第2図 HFIR で照射中のアルミナの電気伝導度変化



第3図 JMTR 炉心に挿入した溶融シリカ光ファイバ中を通過した白色光の出口出力の着色[左より、薄桃、青、水、薄桃、薄桃、薄桃、桃、桃、赤色へと変化](<http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/org/research/12.html>)

## II. トリチウム増殖材料

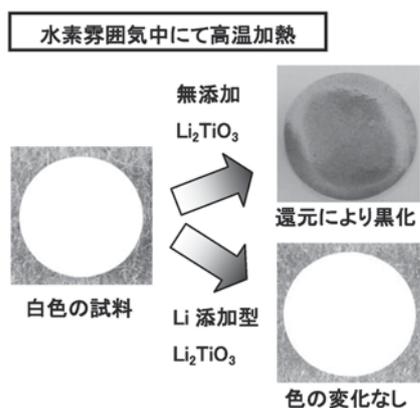
### 1. 概要

核融合炉は燃料に重水素とトリチウムを用いる。重水素は海水から取り出し濃縮して供給するが、トリチウムは天然存在比が極めて低いため、人工的に製造する必要がある。トリチウム増殖材料として、日本では優れたトリチウム放出特性等の観点から  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  を候補材料として選定しているが、高温・還元・中性子照射環境では、リチウム(Li)の核的燃焼(トリチウムへの変換)、Li蒸発及びチタン(Ti)の水素還元による酸素欠損に伴う結晶構造変化が各種特性に影響を与える。そこで核融合環境下でも安定な先進的トリチウム増殖材料を創製した。また、トリチウムは、主に ${}^6\text{Li}$ の反応で生成するが、同位体存在比は ${}^6\text{Li}$ が7.4%、 ${}^7\text{Li}$ が92.6%であるため、核融合炉運転に必要なトリチウム量を確保するためには40~90%濃縮 ${}^6\text{Li}$ が必要である。したがって、 ${}^6\text{Li}$ 濃縮技術開発はトリチウム生産のために最も重要な課題である。

### 2. 先進的トリチウム増殖材料

まず先進的トリチウム増殖材料として、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 中のLi含有量を多くすることで、還元されにくい特性を持つことを明らかにした<sup>5,6)</sup>。無添加 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 及びLi添加型 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ の水素雰囲気中で高温加熱前後の色の変化を観察した結果、無添加は水素雰囲気中にて還元反応が生じ、白色から黒色に変化した。Li添加型は水素により還元されず、高温加熱前後での色の変化はなかった(第4図)。

次に、始発原料である水酸化リチウムの水和物( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ )とメタチタン酸( $\text{H}_2\text{TiO}_3$ )を数日間混合させることにより、常温にてこれら始発原料同士の固相反応が進行し、ゲル状とする新たなLi添加型 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ の合成法を開発した<sup>7)</sup>。このゲル状試料を1,200°Cの希ガス雰囲気にて焼成した結果、Li/Ti比を無添加 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ の2.0に対して、2.2までLiを過剰添加でき、X線回折解析からも(XRD)ピークと一致し、 $\text{Li}_4\text{TiO}_4$ 等の他の相を含まず、



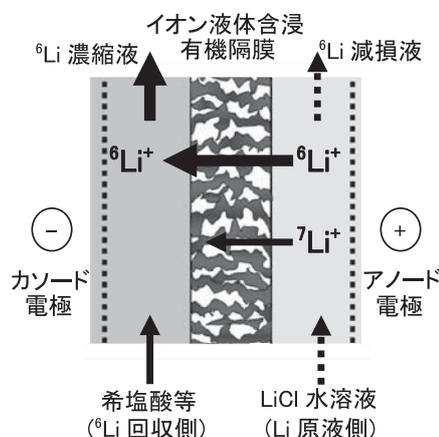
第4図  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ の水素雰囲気中の高温加熱前後の試料色変化

化学的安定性の高い単一相構造の  $\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$  を合成することに成功した。

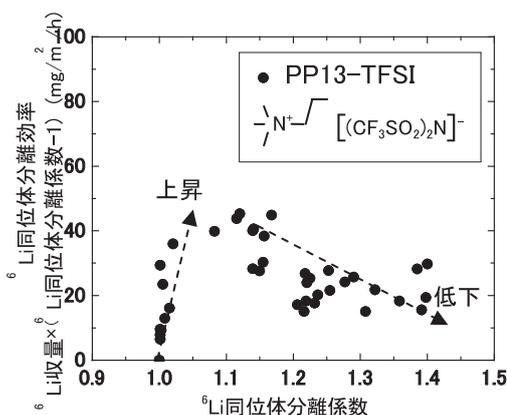
### 3. ${}^6\text{Li}$ 同位体分離法

従来技術としては、水銀を用いたアマルガム法があるが、環境への影響や量産化への問題がある。そのため、新たな手法として近年、リチウムイオン電池の先進電解質材料として期待されているLiイオンを選択的に透過させるイオン液体に着目し、Li同位体分離技術への適応を提案した<sup>8,9)</sup>。天然同位体比のLi水溶液(アノード側)とLiを含まない溶液(カソード側)の間をイオン液体含浸有機膜にて隔てた電気透析セルに電位を加えることにより、イオン液体含浸有機隔膜を通してLiイオンのみが移動する。移動の際、 ${}^6\text{Li}$ イオンは ${}^7\text{Li}$ イオンより移動速度が速いため、移動後のカソード側は ${}^6\text{Li}$ が濃縮した溶液になることを利用したLi同位体分離技術である(第5図)。

まずは、Li原液側と ${}^6\text{Li}$ 回収側をそれぞれ一つとした単セルを用いて、 ${}^6\text{Li}$ 同位体分離の原理確認試験を行った。イオン液体として近年、開発された電位窓の広いPP13-TFSIを使用した結果、 ${}^6\text{Li}$ 同位体分離係数としては、最高で1.4と高い値を得ることに成功した。本数値を、 ${}^6\text{Li}$ 収量との関係を加味した実質的な分離効率( ${}^6\text{Li}$ 同位体分離効率)として、次式で評価した。



第5図 Li同位体分離技術の原理



第6図 最適 ${}^6\text{Li}$ 同位体分離効率の ${}^6\text{Li}$ 同位体分離係数依存性

### ${}^6\text{Li}$ 同位体分離効率

$$= {}^6\text{Li 収量} \times ({}^6\text{Li 同位体分離係数} - 1)$$

その結果、 ${}^6\text{Li}$  同位体分離効率は ${}^6\text{Li}$  同位体分離係数 1.05まで急激に上昇し、1.15以降は逆に収量が減少することにより ${}^6\text{Li}$  同位体分離効率が下がる結果が得られた(第6図)ことから、既存技術の水銀アマルガム法の ${}^6\text{Li}$  同位体分離効率1.06とほぼ同等で、かつ対環境性により優れた手法として適用できることを明らかにした。

今回発案したイオン液体を用いた電気透析法による同位体分離技術は、日本においても工業化(量産化)しやすい技術でもあり、アマルガム法と同等の同位体分離効率を有することから、既存技術に替わる革新的基礎技術といえ、今後、パイロットプラント規模へ向けた研究開発が期待される。

## Ⅲ. 中性子増倍材料

### 1. 概要

核融合炉ブランケットでは、トリチウムを十分に増殖するため、ブランケット内で中性子をより多く増倍する必要がある。その代表的な材料がベリリウム金属(Be)及びその化合物である。Beは、中性子照射により中性子の増倍反応と同時にヘリウムとトリチウムが生成し、そして蓄積されることになる。Be中のヘリウム生成量は、構造材料中に生成するヘリウム生成量の数十倍以上になり、スエリングによる機械的強度の低下など、材料特性に与える影響が問題となる<sup>10)</sup>。核融合炉においては、20,000 appm He以上及び50 dpa以上の照射を受け、さらに、Beは、高温水蒸気と接すると表面酸化により水蒸気中の酸素を奪い、水素を生成する<sup>11)</sup>。この水素生成反応により、安全上の観点から水冷却を採用しているブランケット設計では、Beの使用最高温度を600℃程度に抑えるなどの制限を設けているが、トリチウム増殖比向上等の観点から、ブランケット内温度をより高くする必要があり、高温下でより安定な材料として、ベリリウム金属間化合物(ベリライド)の製造技術開発を進めている。

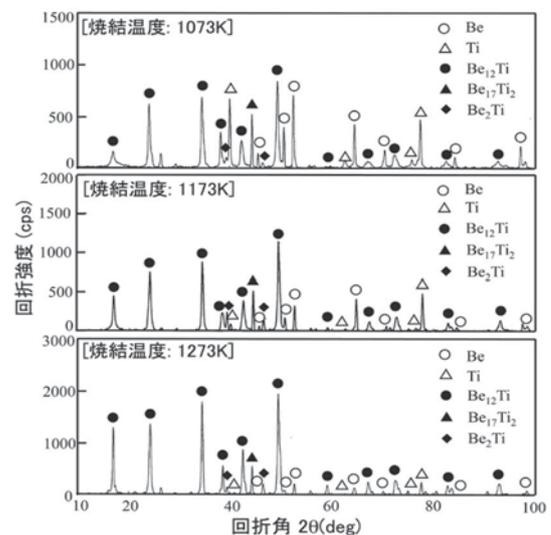
### 2. 先進的中性子増倍材料

従来、真空鋳造法や粉末冶金法が試行されたが、真空鋳造法では、インゴット内に組成のばらつきが生じ、粉末冶金法では、複数の工程を経るため、不純物混入を抑制することが困難であった。また、工程が複雑で、技術的ノウハウを多く含み、再現性や製造コストの観点からも大量製造法としては不向きであった。そこで、新たな合成法として、プラズマ焼結法を適用した<sup>12~14)</sup>。Be<sub>12</sub>Tiベリライド合成の場合、BeとTiの原料粉末をBe<sub>12</sub>Tiの化学量論値の配分で混合して原料粉末を準備する。その原料粉末を、通電するためにグラファイト製の円筒容

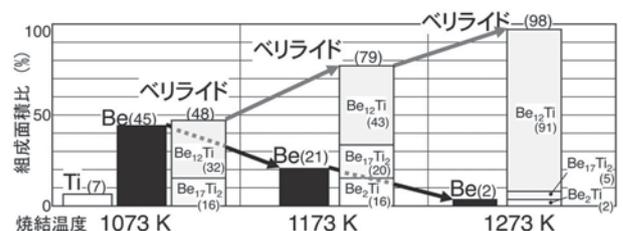
器に入れて加圧用パンチで挟み込み、次に1軸圧縮する。そして、パルス電流を負荷して、原料粉末間に放電を起こすことにより、原料粉末表面を活性化(クリーニング)して、最後に、直流電流を負荷して加熱焼結する。このように、原料粉末表面の活性化により、焼結温度を低下でき、簡便で、焼結性を向上できる手法である。

主な焼結パラメータである焼結温度に対する焼結試料の組成影響について調べた結果について述べる。原料純度が99%以上、粉末粒度が50 μm以下のBeとTiの始発混合粉末を原料とした。そして、焼結圧力と焼結時間を各々50 MPa及び20 minと固定し、焼結温度を1,073, 1,173及び1,273 Kとパラメータにして、Be<sub>12</sub>Tiベリライドの焼結性を確認した。焼結ベリライドのX線回折(XRD)測定結果を第7図に示す。最も低い焼結温度である1,073 K時においては、BeとTiのXRDピークが同定されたが、それらの相対強度は、焼結温度の上昇に伴い減少した。一方、Be<sub>12</sub>TiのXRDピーク強度は、焼結温度の上昇に伴い化合物化が促進し、その相対強度は増加した。

次に組成比を同定するために、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)による断面組織の組成定量分析を実施した。EPMAによる定量分析の結果より求めた、焼結温度に対する断面組織の組成面積率を第8図に示す。



第7図 焼結ベリライドのXRD測定結果  
(上より焼結温度1,073, 1,173及び1,273 K)



第8図 焼結温度に対する試料断面の組成面積率

1,073 Kでは, Beがおよそ45%を占めていたが, 1,173 Kで21%, そして1,273 Kでは2%と焼結温度の上昇に伴い減少した。一方, ベリライドは, 1,073, 1,173及び1,273 Kにおいて, 各々48, 79, 98%と, 1,273 Kで焼結することによって, ほぼベリライド組成で占める材料を合成できることが明らかになった。Be<sub>12</sub>Tiに関しては, 各々32, 43, 91%と増加し, 焼結温度の上昇に伴い化合物化が進み, 目標材料であるBe<sub>12</sub>Tiが約90%以上含むベリライドの合成に成功した。

さらに, プラズマ焼結法のベリライド合成に対する適用性評価のため, バナジウム(V)及びニオブ(Nb)系ベリライドの合成試験を実施した。その結果, Be<sub>12</sub>Tiと同様に, Be<sub>12</sub>V及びBe<sub>12</sub>Nb等のベリライドが合成できることを明らかにした<sup>13)</sup>。これらの結果から, 今まで種々の技術的問題を含んでいたベリライド合成に関して, 再現性良く, 簡便でかつ廉価に合成できる技術的な見通しを得ることに成功した。

今後は, 大量製造技術の確立に向け, ベリライド合成条件等の最適化を進めるとともに, 原型炉では設計により200 t以上必要となるベリライドの再処理技術に関する基盤技術の確立が期待される。

#### IV. まとめ

セラミックスは金属と比較して, 放射線に対して異なる反応を示す。セラミックスでは, 電子励起効果が動的に大きな特性変化を引き起こし, 更には構造変化を引き起こす場合があることに留意する必要がある。また, セラミックスでは電場, 磁場等の存在が照射効果に大きな影響を与える場合がある。半導体を含む機能性材料は放射線に対して比較的容易に特性変化を引き起こすが, 核融合炉では放射線による特性変化を十二分に勘案した上で, プラズマ近傍で使用することが不可避であり, そのための工学課題を解決することが必要である。

核融合炉ブランケットにおけるトリチウム増殖機能材料であるトリチウム増殖材及び中性子増倍材に関しては, より高温及び高照射下においても健全な先進的機能材料の開発が行われており, 大量製造技術に一定の目処が得られつつある。また, 資源に乏しい日本においては, <sup>6</sup>Li濃縮技術や再処理技術に関しても, 日本独自にこれらの調達技術の基盤を構築することは, 原型炉の早期実現に向けて, 必要不可欠である。

#### —参考文献—

- 1) W.D. Kingery, *et al.*, *Introduction to Ceramics*, John Wiley & Sons, (1976); 日本語訳「セラミックス材料科

学入門(基礎編, 応用編)], 内田老鶴圃, (1980).

- 2) S. Yamamoto, Design Description Document of ITER-EDA, WBS 5.5 M, Radiation Effects, ITER-JCT Garching(1998).
- 3) D. L. Mansur, ed., *Comprehensive Nuclear Materials*, Elsevier. (2012).
- 4) 渡部 雅, 平成23年度東北大学工学系大学院博士論文, (2012).
- 5) T. Hoshino, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **75-79**, 939-943 (2005).
- 6) T. Hoshino, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **82**, 2269-2273 (2007).
- 7) T. Hoshino, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **417**, 684-687(2011).
- 8) T. Hoshino, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **417**, 696-699(2011).
- 9) T. Hoshino, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **86**, 2168-2171 (2011).
- 10) A. Khomutov, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **307-311**, 630-637 (2002).
- 11) R. A. Anderl, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **258-263**, 750-756 (1998).
- 12) M. Nakamichi, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **417**[1-3], 765-768 (2011).
- 13) M. Nakamichi, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **86**[9-11], 2262-2264(2011).
- 14) M. Nakamichi, *et al.*, To be published in *Fusion Eng. Des.*

#### 著者紹介



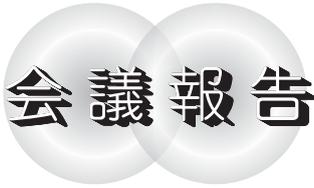
中道 勝(なかもち・まさる)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)核融合炉ブランケット増殖機能材料(特に, 中性子増倍材料), 照射試験技術の研究開発



星野 毅(ほしの・つよし)  
日本原子力研究開発機構  
(専門分野/関心分野)核融合炉の燃料製造に必要なトリチウム増殖材料(リチウムセラミックス)開発, 海水や都市鉱山からのリチウム資源回収の技術開発



四竈樹男(しかま・たつお)  
東北大学 金属材料研究所  
(専門分野/関心分野)原子炉材料, 照射損傷



## 「2012年秋の大会」倫理委員会セッション報告

2012年9月20日(広島大学 東広島キャンパス)

福島第一原子力発電所事故により、原子力に対する国民の信頼は大きく損なわれた。事故後1年半を過ぎようとしているが、いまだに多くの方々が避難を強いられており、事故原因の究明も途上であり、事故の収束が見えていない状況が続いている。

原子力に対する国民の信頼を再び取り戻すためには、避難されている多くの方々が故郷に戻ることができるようになるとともに、福島第一原子力発電所で何が起きたのか、事故の収束の道筋が明らかにされる必要がある。日本原子力学会としては、このような取組みに専門家集団として全面的に参画していくことが求められているが、併せて、学会員が再度、倫理面から今回の事故を考察し、教訓を学びとり、真摯に改善活動を継続しなければならぬものと考え、本セッションにおいて議論した。

### 1. 原子力学会倫理活動の過去・現在・将来 そして未来

西原元倫理委員会委員長より、原子力学会倫理規程制定までの経緯の紹介があった。1995年「もんじゅ」2次系ナトリウム漏えい事故、1998年使用済燃料輸送容器データ改ざん問題等を契機に、学会員の「倫理教育」の必要性が強く認識され、1999年広島での「秋の大会」で技術者倫理に関して世界的に権威である Luegenbiehl 教授の特別講演が行われた。1999年9月 JCO 事故が起きたまさにその日に日本原子力学会の「学会倫理問題検討会」の第1回会合が行われ、2001年9月の理事会で日本原子力学会倫理規程が制定された。

次いで、福島第一原子力発電所事故が起きた現在、我々が留意すべき事項として、日本の原子力行政からいつの間にか「倫理」という用語が消え、「安全文化」のみが取り上げられてきたこと、欧米では PRA という用語が、日本では PSA に置き換わって使われていること等、「ムラのことば」(JARGON(業界用語))が安全問題の通奏低音として受け取る側にサブミナル的に作用している危険性が指摘された。

将来のあり方として、エンジニアは「指令言語」を使いやすい性向にあるが、「世間とそれぞれの専門領域の橋に当たる用語を大切に扱うことは、常に一般市民に開かれてある姿を保っているか否か、という倫理上の問題なのである……」という今道友信氏の論文を引用するとともに、原子力専門職の間には相互理解に欠け、「偽・階層性」とも呼べる関連性があり、それが安全問題に影を落としている可能性があるため、専門職グループ間での相互理解を進める取組みが重要であることが指摘された。

未来をどのように構築していくのかについては、ドイ

ツの「安全なエネルギー供給に関する倫理委員会」での内容が紹介され、「目標を定めて技術的問題、社会的問題を精査し、国民の意識を高めることが先決」であり、「未来の人材を今から育成する必要がある」と指摘された。

最後に、学会幹部はこれからも学会倫理活動にリーダーシップを発揮すること、決められた枠組みからの逸脱を敬遠しないこと、「安全文化」と「技術倫理」は対立する概念ではなく、技術倫理は安全文化を構成する重要な一つの要素であること、専門家には科学的合理性と技術(者)倫理が求められていることを常に意識する必要があることを指摘された。

### 2. 今後、倫理委員会として取り組むべき方向性 について

大場倫理委員会委員長より、原子力学会倫理規程の前文において原子力のメリットとリスクを併記しているが、その制定の過程では、「あえてリスクを書く必要性はない」との意見もあったことの紹介があり、我々はリスクについて思考停止状態に陥っていないか、再度、検証が必要との指摘があった。また、倫理委員会としては、今後も学会理事も参加できる形の取組みを進めていくこと、社会・環境部会セッションで「学会員も事故後、不安を抱えている」との調査結果の報告があったが、これは自然なことであり、これからも福島の人にきちんと向き合った活動を進めていく必要があること、テロ対策等は原子力業界以外の知見も取り入れていく必要があること、等の説明があった。

### 3. 議論

会場よりいくつかの意見が出された。主な内容は、2003年に原子力の安全規制に品質マネジメントシステム(QMS)が導入されたが、規制がQMSの要求事項に対する適合性を偏重した結果、原子力安全に寄与しない軽微な不適合まで過剰な評価が行われ、現場でのモチベーションを著しく低下させた。原子力の安全確保には技術力を基盤とし、その技術を有機的に適切につなぎ合わせていく管理技術、さらには、それらの活動に魂を入れる倫理の3つが不可欠であり、QMSの誤った運用は早急に正さなければならない。また、倫理教育の面では、倫理規程の内容を知らしむるだけでは不十分で、実際の業務において正しく判断し行動できることが重要であり、そのためには、倫理規程の精神と実務を近づける教育など工夫が必要である、等の意見が出された。

(日立 GE ニュークリア・エナジー・柴田洋二、  
2012年10月1日 記)