

巻頭言

1 インターネット世論と社会物理学

全 卓樹

解説

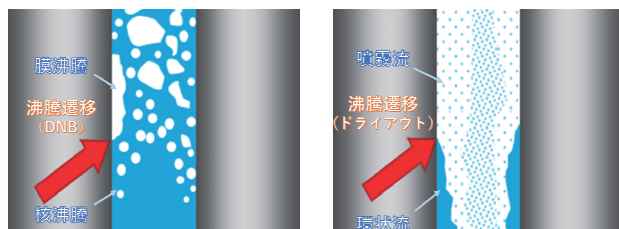
11 原子炉における機構論的限界熱流束評価技術の確立に向けて

Part1：軽水炉燃料における現在の限界熱流束予測手法と課題

原子炉設計における効率的な燃料設計と最適な安全評価のために、機構論に基づいた限界熱流束評価技術が望まれている。Part1 では、軽水炉燃料における現在の限界熱流束予測手法と課題について述べる。

「原子炉における機構論的限界熱流束評価技術」研究専門委員会

大川富雄，淀 忠勝，成島勇気，高野賢治



沸騰遷移の形態（左は DNB、右はドライアウト）

16 Part2：機構論的限界熱流束予測評価手法確立に向けた研究とその課題

Part2 では、これまでの限界熱流束機構に関する基礎研究やその予測手法確立に必須な数値解析手法の発展にふれ、課題提起を行う。

「原子炉における機構論的限界熱流束評価技術」研究専門委員会

大川富雄，森 昌司，劉 維，小瀬裕男，吉田啓之，小野綾子

時論

3 カーボンニュートラル燃料への原子力

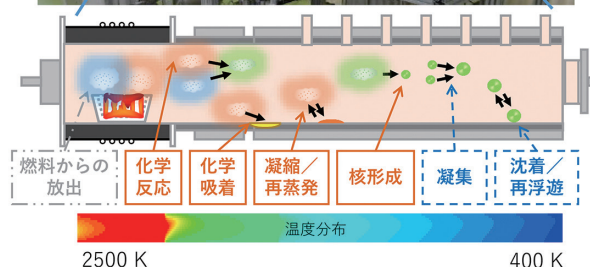
堀 雅夫

解説

21 沸騰水型原子炉内を移行するセシウムの化学挙動評価に向けて

シビアアクシデント時に BWR の制御材ホウ素は、セシウム等の化学挙動や移行挙動に大きな影響を与える。そのため炉内移行時の化学挙動を評価できる装置を開発して、ホウ素の影響を評価した。

三輪周平，宮原直哉，中島邦久，井元純平，鈴木恵理子



核分裂生成物化学挙動評価実験装置 TeRRa

42 Column

時代を進める太刀

秋津 裕

福島で学ぶ福島3

石井伸弥

『科学技術』とその未来

島袋慶子

「知ること」から「自分事」として考えるために

西川亜佑美

炎上に見る「議論を教育する」ことの重要性

服部杏菜

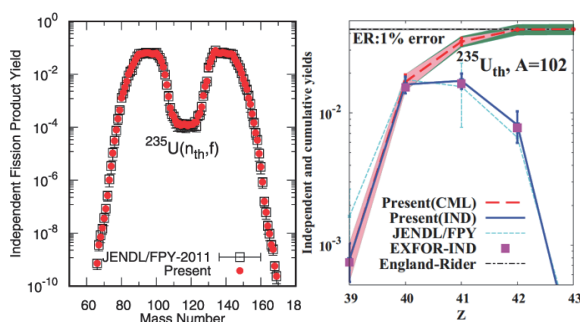
ポストコロナ：女性の眼差し

坂東昌子

32 核分裂収率データ評価とその利用の半世紀

核分裂収率は最もユーザーが多く応用範囲が広い核データだろう。しかし実験データは多くが断片的である一方、データを利用する側からは包括性と信頼性があるものが求められる。そのギャップを埋めるのが「核分裂収率評価」である。

吉田 正



各 Mass Chain で FP はベータ崩壊を繰り返して最終的に安定核に落ち着く。ベータ崩壊では、過剰にある中性子が陽子に変わるが、中性子と陽子の数の和（質量数 A）は変わらない（図右 CML）。左図は質量収率分布。

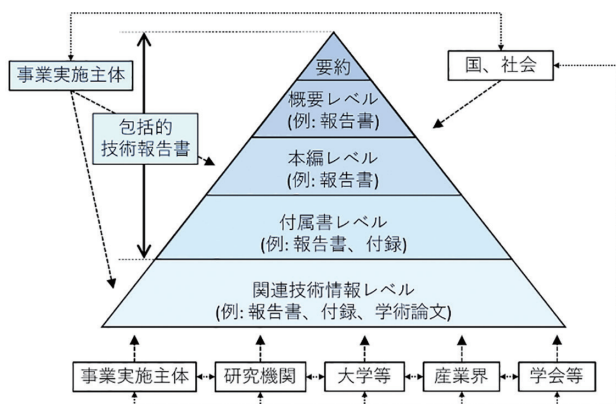
連載講座

オールジャパンでとりくむ地層処分のいま(1)

37 日本における地層処分計画の概要

わが国の地層処分はこれからどのように進められていくのか。連載初回となる今回は、研究開発・制度整備のこれまでの経緯と、技術基盤の整備における関係機関の連携について述べる。

杉山大輔, 佐々木隆之

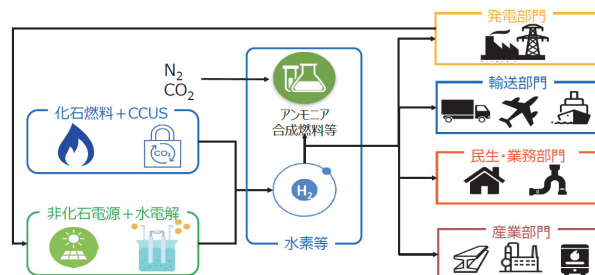


さまざまなステークホルダーが対話する際の共通基盤となることを期待して構築されるセーフティケース（処分施設の安全を説明する文書）の階層的体系の概念例

26 世界情勢の構造的変化とエネルギー(5) 脱炭素技術の展望：水素、CCUS 技術

水素は鉄鋼や化学、航空、貨物車での利用や、水素発電の導入が計画されており、水素輸入に向けたサプライチェーンの検討の動きが進展している。CCUS 技術は CO₂ 回収や貯留に加え、カーボンリサイクルを通じて、脱炭素化への貢献が期待されている。

小宮山涼一



クリーン水素等と供給源および需要先（経産省：今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理案，2021）

FOCUS 倫理規程制定 20 年を迎えて (1)

45 倫理規程は必要ですか

中島 健

理事会だより

47 2021 年秋の大会オンライン開催報告

千葉 敏

- 5 NEWS
- 36 From Editors
- 46 新刊紹介「放射線・RI 利用—現状と将来」工藤久明
- 48 会報 原子力関係会議案内、人事公募、新入会一覧、寄贈本一覧、2022 年度フェロー候補推薦募集、英文論文誌 (Vol.58, No.12) 目次、和文論文誌 (Vol.20, No.4) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧
- 52 Vol.63 (2021), No.12 J-STAGE 閲覧 ID・パスワード
- 後付 総目次・著者索引 (Vol.63, Nos.1~12)

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(https://www.aesj.net/publish/aesj_atomos/meyasu) にお寄せください。

学会誌ホームページはこちら

https://www.aesj.net/publish/aesj_atomos

インターネット世論と社会物理学

巻頭言



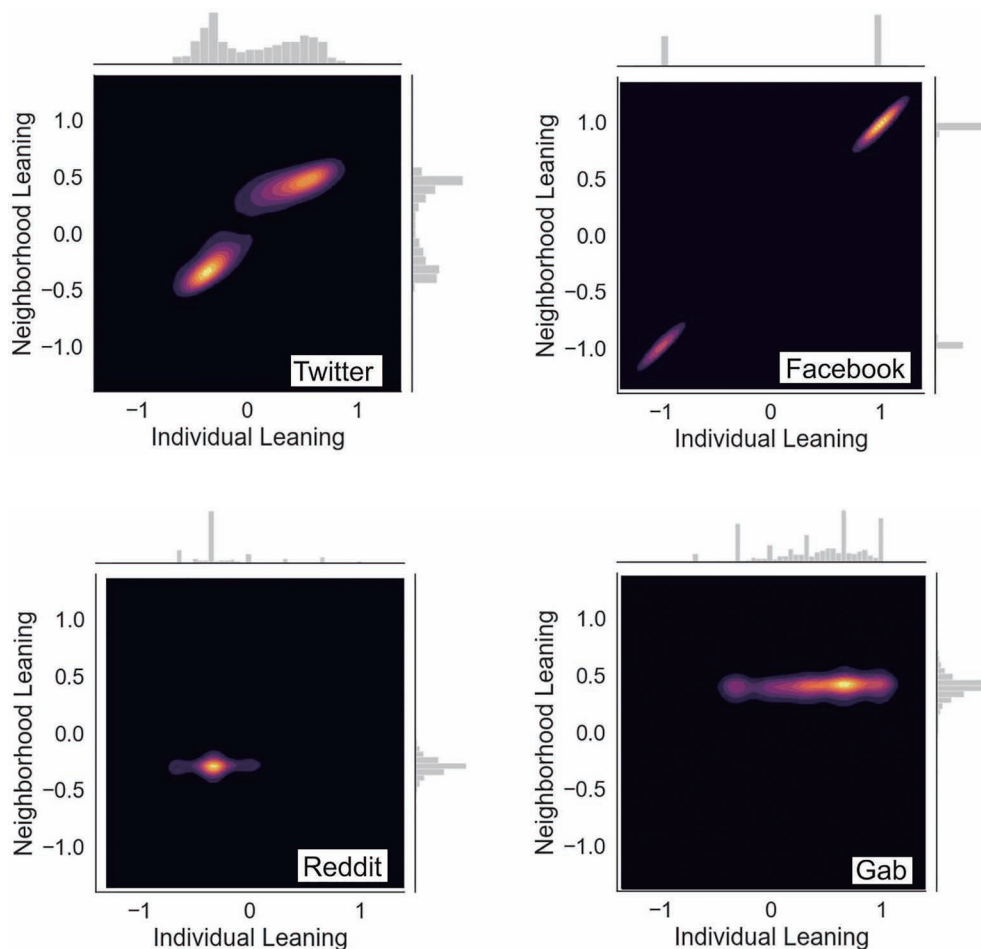
高知工科大学教授

全 卓樹 (ぜん・たくじゅ)

東京大学理学系大学院博士課程修了，理学博士。
ジョージア大学，メリーランド大学などを経て
現職。専攻は量子力学，数物理学，社会物理
学。著書に『銀河の片隅で科学夜話』など。

ソーシャル・ネットワーキング・サービス SNS は，発祥当初，立場の垣根を越えた公正な社会的合意をもたらす，新しい社会のインフラとなることが期待された。実際に SNS 上で実現したのは，視野の狭いイデオロギー集団に分断された，刺々しさを気の休まらない言論世界である。それは現実世界に染み出し，民主主義的な合意形成を脅かしている。分断の実態は学術誌上の「反響室効果」の研究から窺い知ることができる。ネット上で人は

エコー・チェンバー，すなわち反響室の中に居て，仲間から自分と同じ意見ばかり聞かされ，世論の分断が進行するというのだ。米国科学アカデミー紀要誌上に最近掲載された，マッテオ・チネッリ博士たちイタリア・グループの研究を見てみよう。「地球温暖化」「ワクチン摂取」といった事項について，SNS 上の発言の分析からユーザー個々人の立場に -1 から 1 までの数値の「賛否度」を割振る。そしてユーザーの賛否度を横軸に，ユーザー



各 SNS における個人賛否度対フォロワー賛否度の分布 (M.Cinelli, et al., PNAS 118 (2021) e2023301118 より)

のフォロワーたちの賛否度の平均を縦軸にしてグラフの平面上に点を打っていく。何十万というユーザーから作られたグラフには、大多数の点が集まる二つの分割された領域ができていた。自分とフォロワー双方とも賛否度が高い「右上の」領域と、双方とも賛否度が低い「左下の」領域である。ほぼ全ての SNS ユーザーは、賛成派もしくは反対派からなる同質の仲間だけの、エコー・チェンバーに住んでいるのである。

成熟につれてネット世界が、現実世界に似てきたのだろうか。われわれは日頃、立場の異なる人の言説を避けて、地域ごと職場ごと派閥ごと住み分けて生きる。すべては快適に過ごそうという、人間の本性に適った行動の結果だろう。それでも社会が成り立つのは、他者との相互作用を律する法律や慣習、そして分極集団の妥協の場としての間接民主主義制度があるからだろう。ネット世界の断絶と対立は、その一部は技術的制度的な未完成に起因するようにも思える。チネッリ論文を仔細にみれば、フェイスブックではツイッターより極端な世論の分断がみられる。レディットおよびギャブという他の二つの SNS の分析も見出される。粗暴な言説を規制するレディットでは二極への分裂はみられず、そこは「理性

の独裁」が支配する左派一色の同質空間である。言論規制の皆無なツイッターと称すべきギャブにあっては、右派中心だがスペクトルの広い「言論の自由戦士」たちによる、憎悪に満ちた恒久的戦闘が繰り広げられている。SNS の制度設計次第で、現実の戯画のような多様な世界が現出するのだ。ネット上のエコー・チェンバー発生過程を、同質な人々の間からどのように党派が立ち上がるかの観察場と見做す事もできる。SNS は現実社会の力学を数理的に研究する「社会物理学」の実証実験室なのである。確信的右派のメッセージは確信的左派のメッセージより左右の穏健派に届いている。ツイッター上の元首相をめぐる言説の分析から、このような世論の現状が浮かび上がってくる。多数決民主主義の現場は、コンドルセ的な集合知ではなく確信を持った少数者の支配であり、天邪鬼な逆張り派の存在は、少数者の主導権を弱めずにむしろ強める。このような民主主義の背理の存在を、いまやわれわれは社会物理学の研究から理解できる。科学的解明と設計でより良い社会を実現する研究が、ネット社会の不条理の中から立ち上がるのだとすれば、それは人類にとっての祝福であろう。

(2021 年 10 月 8 日 記)



カーボンニュートラル燃料への原子力 “原子力水素は気候変動との戦いのゲームチェンジャー” (IAEA)



堀 雅夫 (ほり・まさお)

東京大学大学院(化学工学)修士修了, 原研および動燃(ともに当時)で高速増殖炉の研究・開発に携わった後, 現在は原子力システム研究懇話会で, 将来エネルギーシステムの研究を手がける。著書に「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」(2020年, Amazon)。

カーボンニュートラルの水素の供給

カーボンニュートラル(CN)達成のために, これまで石油・石炭・天然ガスなどの化石燃料が担ってきた原料用や加熱・運輸などの燃料用の需要を, 今後は水素およびその化合物に代える必要が出てきた。水素は現在主に肥料用のアンモニアの製造や石油精製などの工業用途で世界で年約 7,000 万トン使用されている。これに新たな工業用や運輸用の需要が加わるために 2050 年には約 10 倍の規模になると見込まれている。日本の水素の需要は, 第 6 次エネルギー基本計画素案によると, 現在は工業用途の年 200 万トン, 将来は 2030 年 300 万トン, 2050 年 2,000 万トンと増加していく。

世界的に当面の CN 水素の供給は, これまでの工業用の水素供給の主製造方法である天然ガスの水蒸気改質プロセスによる水素「グレー水素」の製造時に排出する CO₂ を回収貯留(CCS)して CN 化した「ブルー水素」の供給に頼ることになる。

将来は世界的に, CN 水素の本命として太陽光・風力などの再生可能エネルギー電力による電気分解水素「グリーン水素」が期待されている。太陽光発電によるグリーン水素は, 北アフリカ・中東・豪州・中米などの日射量の大きい地域では, 電気分解技術の向上とあいまってブルー水素より安価になると目されている。これらの地域からパイプラインで水素を輸送できる地域では将来グリーン水素の利用が進むと見込まれ, 例えばドイツは地中海横断の天然ガスパイプラインを利用して日射量の大きい北アフリカからグリーン水素を輸入する計画を進めている。

日本もこれまで国内の工業用に天然ガス水蒸気改質のグレー水素を使用してきたので, このプロセスに CCS を追加したブルー水素を供給するのが当面の対策と考えられる。CCS の運用システムを整備して発電に加えて水素製造でも CCS の利用を可能にすれば, ブルー水素の国内製造は可能と考えられる。

一方グリーン水素の製造では, 日本は日射量・風況・

設置土地面積などの自然条件に恵まれておらず, 国内での製造はコスト的・量的に不利になる。海外のグリーン水素やブルー水素の輸入は液体水素・有機媒体利用・アンモニアなどの方法による船舶輸送になるため, エネルギー効率が低くなり, コスト的に不利になる。

原子力による CN 水素の供給

日本の当面の CN 水素供給は, 国産のブルー水素と一部は海外から水素/アンモニアの輸入に頼るとしても, 水素需要が 10 倍に膨らむ将来に向かってどのような方策を取るべきか? 日本のこれまでの研究実績とポテンシャルから考えて, 原子力による水素供給が最も頼りになる方策と考える。

本年 9 月 IAEA 総会のサイドイベントとして「クリーンエネルギー転換のための原子力水素の製造・利用における革新」と題する会議が開催された。このイベントで IAEA は「原子力水素は気候変動との戦いのゲームチェンジャー」と謳って, 原子力水素「パープル水素」(ピンク, イエローの呼称もある)の産業分野のクリーンエネルギー転換における役割に大きな期待を示した。

主要国の水素戦略では, フランス, 米国, ロシア, 英国などが原子力水素供給を計画/検討している。フランスは既存軽水炉により 2030 年 650 万 kW_e 容量の電気分解水素の計画を発表している。米国は, 議会で審議中のインフラ法案(上院は 9 月に通過)の中で, 国内に整備する 4 箇所の水素供給ハブにブルー水素・グリーン水素とともに原子力水素を含めている。

日本では, 原子力水素の研究が本格化した 2000 年ころから, 原子力による水素製造は発電と同様に技術的・経済的・資源的に最も有利な方法と考えられ研究開発が進められてきた。現在検討されている原子力による CN の水素製造方法を表 1 に示す。

この中で軽水炉の電力で水を電気分解する方法は実用技術として各国の計画に取り入れられている。水の電気分解 (40 kW_eh/kgH₂, IRENA による 2050 年想定) による場合, 日本の 2050 年の水素需要 2,000 万トンに製造す

表1 原子力によるCNの水素の製造方法

水素製造方法 (原料)	供給原子力エネルギー		製造 プロセス (代表的)
	形態	原子炉 (代表的)	
電気分解法 (水)	電気	軽水炉	アルカリ水電解 固体高分子膜
高温水蒸気電気分解法 (水)	電気 + 熱	高温ガス炉 Na炉・熔融塩炉	固体酸化物電解 (高温・中温)
熱化学分解法 (水)	熱	高温ガス炉	ISプロセス
原子力加熱 天然ガス 水蒸気改質法*	熱	高温ガス炉 Na炉・熔融塩炉	高温プロセス 中温プロセス (透過膜改質)
原子力加熱 バイオマス 水蒸気ガス化法	熱	高温ガス炉	高温プロセス (負排出可能)

* CO₂回収貯留(CCS)必要

るには150万kW_eの軽水炉(設備利用率85%)約80基を必要とする。

水の電気分解/熱化学分解による水素製造方式では高温になるほど効率が上がるので、高温炉を使用する場合には軽水炉の半分程度の熱出力で済む。

原子力加熱の天然ガス水蒸気改質プロセス

表1の中の原子力加熱・天然ガス水蒸気改質法は、プロセスで必要な反応熱を原子力から供給する方法である。

天然ガス + 原子力熱 - CO₂ → CN 水素

この方式については、2000年頃に原研が高温ガス炉との接続の検討のため炉外装置による試験をしておりⁱ、また三菱重工業ほかⁱⁱが500~600℃で水蒸気改質可能な透過膜方式にナトリウム冷却炉から熱供給するプラントの概念設計を行っているⁱⁱ。最近ロシアがこの方式を検討しており、ブルー水素からの発展型として有望と考える。

2050年に必要な2,000万トンの水素をこの方式で製造する場合の天然ガスの必要量は年約4,000万トンで、原子力加熱のないブルー水素で供給した場合の5,700万トンより約30%の節減になるⁱⁱⁱ。(日本の天然ガス輸入量は2019年7,650万トン)

この水蒸気改質反応で必要な原子力加熱量は174TW_thで、この熱量は電気出力150万kW_e軽水炉(設備利用率85%)7基分に相当する。この熱量を改質方式により中温のナトリウム冷却炉または高温ガス炉から供給する。

同じ量の水素を製造するのに原子力の熱供給量が電気分解方式に比べて約1/10と小さいのは、この方法が炭

素による水の還元・水素生成に必要な反応熱のみを原子力が供給するからである。これにより加熱のための炭素燃焼を回避できるので、天然ガス使用量の節減とCCSの容易化の利点がある。水素製造コストの試算でも最近の天然ガス価格ではブルー水素より低くなるⁱⁱⁱ。

原子力加熱のバイオマス水蒸気ガス化プロセス

表1の中の原子力加熱・バイオマス水蒸気ガス化法は、炭素を含む原料としてCNのバイオマスを用いて水蒸気ガス化反応を起こさせるので、この時に生成するCO(一酸化炭素)を燃料として使用しても、あるいはCO₂にして排出してもプロセスはCNになる。必要な反応熱を原子力から供給することによりバイオマスの燃焼を回避して高収率の水素・燃料の製造ができる^{iv}。

バイオマス + 原子力熱 → CN 水素/燃料

生成する合成ガス(CO+H₂)はそのままCNの燃料として、あるいはフィシャートロプシュ反応などでガソリン・軽油などの炭化水素に転換しCNの燃料として、工場・自動車・機器で従来の化石燃料製品の代替として使用できる。

さらに、このプロセスの中で炭素(バイオチャー)やCO₂を回収貯留すれば負排出が可能になる。バイオマスの水蒸気ガス化反応プロセスは従来技術なので、高温原子炉による加熱の実証が必要となる。

2050年に必要な2,000万トンの水素をこの方式で製造する場合は、「バイオマス日本総合戦略」による国内の賦存量の1.3倍程度のバイオマス量が必要となる。原子力加熱必要量は約240TW_thで電気出力150万kW_e軽水炉(設備利用率85%)約10基分の熱量に相当し、高温ガス炉から水蒸気ガス化プロセスに供給する。

2050年に向う日本のCN燃料供給の方策

2050年に向う日本のカーボンニュートラル燃料の供給には、量的確保と経済性から上に述べた原子力と炭素資源を利用するプロセスの開発・実用化を推進したい。

具体的には、当面は従来の天然ガス水蒸気改質にCCSを追加したブルー水素で主に供給していくとして、

▶中期的(2040年頃～)には、これを原子力加熱・天然ガス水蒸気改質法に転換して、CNの水素の供給。天然ガスの節減とCCSの容易化

▶長期的(2050年頃～)には、原子力加熱・バイオマス水蒸気ガス化法により、水素のほか炭素を含むCN燃料を供給、このプロセスの中で炭素(バイオチャー)やCO₂を回収貯留することにより負排出へ展開が想定される。

これらCNの燃料製造プロセスには日本が研究開発してきた高温原子炉などの技術が有効に利用される。

(2021年10月15日記)

ⁱ 稲垣嘉之ほか「高温ガス炉HTTRを用いた水素製造システムの炉外実証試験計画」日本原子力学会誌 Vol.41, No.3 (1999)

ⁱⁱ M. Tashimo, et.al. “Concept of FR-MR” ICONE-11: JSME-ASME [Japan, 2003]

ⁱⁱⁱ 堀 雅夫「原子力熱供給の水素生産への効果—天然ガス水蒸気改質プロセスの場合」AESJ 2021 年秋の年会(2021年9月)

^{iv} 堀 雅夫「バイオマスと原子力による合成ガス/燃料/水素の製造と大気中CO₂の除去」JSME 動力・エネルギー技術シンポジウム 2021 E121 (2021年7月)