

令和6年度技術士試験「原子力・放射線部門」対策講座

令和5年度技術士二次試験「原子力・放射線部門」

ーそのポイントを探る～全体解説，必須科目及び選択科目の設問と解説ー

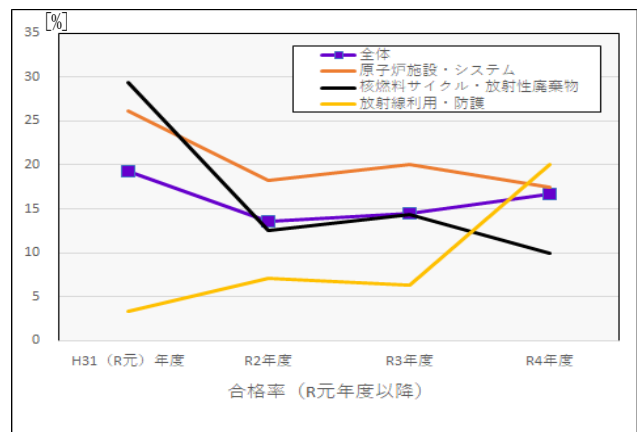
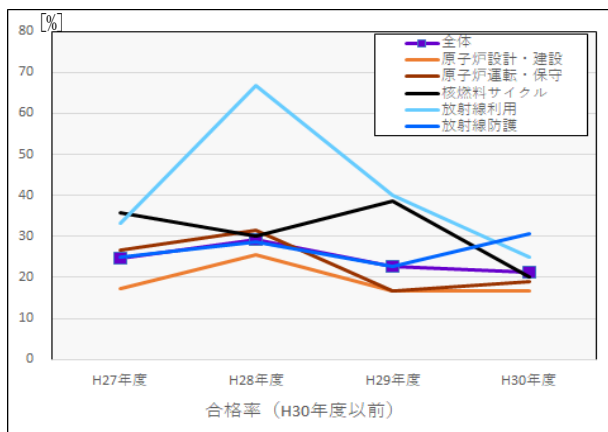
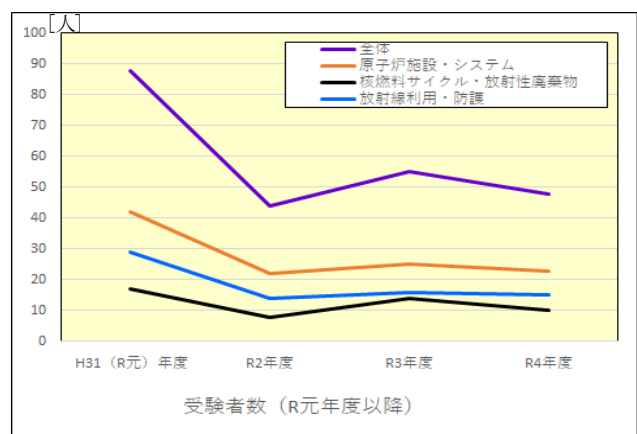
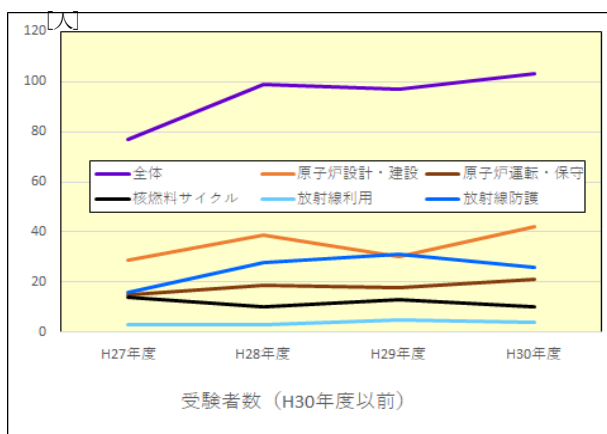
一般社団法人 日本原子力学会 教育委員会 技術者教育小委員会 監修

1. はじめに

令和5年（2023年）7月17日に技術士第二次試験「原子力・放射線部門」の筆記試験が実施された。2004年に本部門が新設されてから2023年度で20回目を数える。その間、試験制度は何度か見直されているが、直近では、令和元年度（2019年度）の見直しで大きく変わった。選択科目の統合・再編がなされ、技術士に求められる資質・能力（コンピテンシー）を直接的に問うような設問が増えている。近年における技術士 原子力・放射線部門の受験者数と合格率の推移を下図に示す。令和4年度（2022年度）の原子力・放射線部門の受験者数は48名であり、2019年度以前の100名前後と比べると受験者数が少ない傾向が続いている。COVID-19蔓延の影響が大きいと考えられるが、依然として低調である。

2022年度の合格者を選択科目別にみると、原子炉システム・施設4名、核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分1名、放射線防護及び利用3名の合計8名であり、合格率は16.7%であった。合格率の推移は、2013年度から2019年度までは、全体で概ね20～30%程度であったが、2020年度以降は約15%程度に低下している。合格率低下の要因として、2019年度の第二次試験から選択科目数の再編により、1科目あたりの出題範囲が拡大したこと等、制度の見直しが少なからず影響していると思われる。

このように難関である技術士の資格を取得するためには、技術士に求められる資質・能力とは何か、試験で問われていることは何かを理解することに始まる。社会的課題は必ずしも現時点で正答が存在するという類のものではなく、これから解決していかなければならないことであり、模範的解答を暗記し、それを記載すれば合格するというものではない。関連する知識はある程度必要になるが、単なる技術的知識のみでなく、直面している課題に対しどのようにアプローチ・アクションし解決に導くかを考える習慣を身に付けることが必要となろう。本解説に記載した事項は、自分なりの解を導き出すためのヒント、きっかけに過ぎない。社会的課題とされていることについてのアンテナを高くし、情報を収集して自分なりの見解をまとめるなど、自らの資質・能力の向上、業務の質の向上、公益確保、社会貢献につなげられるよう、技術士を目指す方には真摯に取り組み、向き合ってもらいたい。



令和4年度までの受験者数及び合格率の推移

個別の出題の傾向については、3. で紹介するが、時事問題をテーマとした問題は過去の出題傾向と変わらない。2023 年度の試験問題では、GX、消耗部品のメーカ撤退や許認可対象設備の製作ミスのような最近の現場で起こりそうな困りごと、次世代革新炉、重粒子線を用いた放射線育種、放射線を用いた物質材料分析、TAT に用いる放射性物質製造などの最新技術に係る問題が出題されている。

2. 第二次試験の試験要領

第二次試験の試験要領は、前年度と同様であり、詳細は日本技術士会ホームページの試験・登録情報の「令和6 年度 技術士第二次試験の実施について」、「発表資料（技術士試験合否判定基準）」及び「技術士第二次試験実施大綱」を参照いただきたい。

(1) 筆記試験

- (a) 必須科目及び選択科目は、いずれも記述式により行う。
- (b) 筆記試験の問題の種類及び解答時間は、次のとおりである。

問題の種類	解答時間	配点	合否判定基準
I 必須科目 「技術部門」全般にわたる専門知識、応用能力、問題解決能力及び課題遂行能力に関するもの	2 時間	4 0 点満点	6 0 %以上の得点
II 選択科目 「選択科目」についての専門知識及び応用能力に関するもの III 選択科目 「選択科目」についての問題解決能力及び課題遂行能力に関するもの	3 時間 3 0 分	6 0 点満点 3 0 点 3 0 点	6 0 %以上の得点

(2) 口頭試験

- (a) 口頭試験は、筆記試験の合格者に対してのみ行う。
- (b) 口頭試験は、技術士としての適格性を判定することに主眼をおき、筆記試験における記述問題の答案及び業務経歴を踏まえて実施するものとし、筆記試験の繰り返しにならないよう留意されている。
- (c) 試問事項及び試問時間は、次のとおりである。なお、試問時間を 10 分程度延長することを可能とするなど受験者の能力を十分確認できるよう留意されている。

試問事項	試問時間	配点	合否判定基準
I 技術士としての実務能力	2 0 分	1. コミュニケーション、リーダーシップ 3 0 点満点	6 0 %以上の得点
		2. 評価、マネジメント 3 0 点満点	6 0 %以上の得点
II 技術士としての適格性		3. 技術者倫理 2 0 点満点	6 0 %以上の得点
		4. 継続研さん 2 0 点満点	6 0 %以上の得点

3. 第二次試験での出題傾向とポイント

過年度の解説にも記載しているところではあるが、各設問のポイントについては、「平成 31（2019）年度 技術士試験の概要について」が、各設問で問われている資質・能力を理解する上で参考になると考えられることから、各設問の傾向と併せて記載する。

(1) 必須科目 I

平成 31（2019）年度 技術士試験の概要 《「技術部門」全般にわたる専門知識、応用能力、問題解決能力及び課題遂行能力に関するもの》

概 念	専門知識 専門の技術分野の業務に必要で幅広く適用される原理等に関わる汎用的な専門知識
	応用能力 これまでに習得した知識や経験に基づき、与えられた条件に合わせて、問題や課題を正しく認識し、必要な分析を行い、業務遂行手順や業務上留意すべき点、工夫を要する点等について説明できる能力
	問題解決能力及び課題遂行能力 社会的なニーズや技術の進歩に伴い、社会や技術における様々な状況から、複合的な問題や課題を把握し、社会的利益や技術的優位性などの多様な視点からの調査・分析を経て、問題解決のための課題とその遂行について論理的かつ合理的に説明できる能力
出題内容	現代社会が抱えている様々な問題について、「技術部門」全般に関わる基礎的なエンジニアリング問題としての観点から、多面的に課題を抽出して、その解決方法を提示し遂行していくための提案を問う。
評価項目	技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）のうち、専門的学識、問題解決、評価、技術者倫理、コミュニケーションの各項目

2019年度以降の問題でテーマとされる事項のキーワードを整理したものを下表に示す。

2019年度以降テーマとされた事項（必須科目Ⅰ）

設問	R1/2019	R2/2020	R3/2021	R4/2022	R5/2023
I-1	技術継承と人材確保	事故の汚染土壌を含む 廃棄物管理	国際原子力機関の深層 防護第5層（防災対策）	国内におけるエネルギー 供給	GX基本方針に係る放射 性物質の集約管理
I-2	使用済燃料問題	原子力に関するリスク コミュニケーション	国際原子力機関の基本 安全原則を踏まえたリ スク情報活用	ALPS処理水の海洋放出	放射線測定等の信頼性 確保

必須科目は、上記のように技術部門全般にわたることとされるが、特定の選択科目に有利に働くような設問も少なくない。したがって、いずれか得意な方を選択し、解答することになるが、運悪く2問とも不得意な問題である可能性がある。特に令和2年度から令和4年度の問題では、原子力の側に少し偏った印象の出題となっている。放射線防護、環境モニタリングなどの観点では解答できそうなものの、「放射線利用」（従来の選択科目）を専門とする者には解答が難しかったと思われる。放射線利用を専門とする場合には、福島事故関係、エネルギー情勢、防災、放射線防護の分野でもある程度広く論述できるよう、情報を収集し知識として吸収しておく必要があるだろう。令和5年度は、放射線測定を話題としており、その辺りに配慮されたものかもしれない。

もう少し詳しく場面設定を調べてみる。過去3年で想定されている場面、立場を下表に整理してみる。

設問	R3/2021	R4/2022	R5/2023
I-1	前段の背景的説明はほとんどなく、1F事故で課題が浮き彫りになったとし、国際原子力機関の深層防護第5層（防災対策）について 技術者の立場 での解答を要求	エネルギー基本計画を引用し、「原発依存度の低減」の方針、東欧地区の政情不安、エネルギー資源高騰の状況に触れた上で、 <u>国内におけるエネルギー供給に関する原子力分野における技術者の立場</u> での解答を要求	GX基本方針を引用し、原子力の平和利用、核セキュリティ、核不拡散の項に誘導した後に「利用実態のない放射性物質の集約管理の具体的な方策の検討」の必要性に触れた上で、 <u>集約管理の実現にあたって技術者の立場</u> での解答を要求
I-2	前段の背景的説明はほとんどなく、国際原子力機関の基本安全原則の一文を引用し、リスク情報の活用について 技術者の立場 で解答を要求	1F建屋内の汚染水管理の状況、関連する政府方針で海洋放出を選択しARALAの原則に基づくリスク低減、風評被害の抑制が示された背景に触れた上で、 <u>大規模原子力災害時の汚染水浄化処理後の処理水の海洋放出について、技術者の立場</u> での解答を要求	多種多様な放射線測定・分析が行われていること、環境モニタリング、食品中の放射能測定が社会的に利用されるようになったこと、放射線測定の信頼性確保に係る法改正の背景に触れた上で、 <u>放射線測定の設計・開発又はサービス提供を新たに行う場合の技術者の立場</u> での解答を要求

ここ2年で、問題文中の背景に係る記述のところが長文化している傾向がある。

背景的説明がほとんどないケース、詳細に記述されているケース、どちらの形式で「場面設定」がなされても解答できるように準備する必要があり、その対策が必要である。背景的説明の記述がほとんどない場合には、テーマとされている事項についての予備知識があれば、問題文で触れられていないような切り口とすれば多面的な観点で課題を挙げたという解釈を採りうるので、比較的幅広い視点を自由に指摘しやすい。仮に受験者の思いで他の資料などに記載されていないような事項を挙げていたとしても、論述に論理性があれば、応用能力を示すものとして評価されうる。

逆に、細かく背景が記載されていた場合に、問題文に記載された事項を上塗りするような課題を挙げるような解答構成とすると、多面的な観点から受験者本人が知識・経験に基づいて挙げたものとは評価しにくい。別の切り口で課題を挙げるか、背景で述べられたものを少し深く掘り下げた項目を挙げるなど、工夫する必要がある。状況に応じてではあるが、ある種の制約を受けることになる。逆に、背景で挙げられた事柄の関係性とか共通的な視点に目を向ければ、複合的な課題の捉え方、全体を俯瞰できるという課題解決能力を示す上で、有効な論理での答案構成が可能になると考えられる。

一方、専門分野を限定するような「立場」の設定はほとんどなく、広く技術者の立場で解答することを要求されている傾向にある。今年度の問題がどのような出題のされ方、場面設定、立場設定とされるかは分からないが、試験当日、準備した勉強の範囲外であったとしても、諦めずに解答したいところである。

技術部門全体を対象としているため、問題としては比較的広く認知されているものが題材として出題される傾向にあると考えられる。深い専門知識のみを問う内容ではなく、幅広い知識は必要であるため、原子力を取り巻く状況を日頃から覚知し、それに対する多面的な意見や社会的な取り組みと、それに紐づく知識をセットで身につけておくことは、必須科目Ⅰへの対策になると思われる。

令和5年度、令和4年度では、条件設定の後の設問の記載で「専門技術用語を交えて」という要求がされていること、提案した解決策に

対して「波及効果と懸念事項」を問われていることに特徴がある（それ以前は「新たに生じるリスクとそれへの対応」という問われ方）。設問方法に若干の変化が認められる。

一方で、技術者としての倫理、社会の持続可能性の観点からの要件、留意点を問われることに関しては、一貫して出題されている。

ここで、2023 年 3 月に改訂された技術士倫理綱領と、その手引きに記載されていることについては、目を通して頂きたいところである。倫理といっても単なるコンプライアンス的なイメージのものではなく、公益確保や持続可能な社会の実現への貢献などが含まれることを十分認識し、答案の中にそうしたことも考慮したような記述をする必要がある。

選択問題の学習とも共通することだが、過年度出題された試験でテーマとされた事項を参考に、近年の時事問題を整理し、こうした話題が出題された場合に自己の見解として論理展開できるよう、答案作成の訓練、準備をしておくことをお勧めする。

《テーマの例》

耐震対策・津波対策等の検討における最新知見の取り込み（能登半島地震）、カーボンニュートラルと原子力・放射線分野での個別具体的事項（革新炉、核燃料サイクル、廃棄物処分、農業利用、工業利用等）との関係、AI（生成 AI を含む）の活用、1F 関係（燃料デブリの取出し時、その後の保管管理、海洋放出と環境モニタリング、国際的対応）、加速器・放射線を利用した物質研究・材料開発に関連する施設の利用拡大～地域共生や産学官連携、核セキュリティ対応不備への対策、検査制度の効果的運用、原子力事業者としての自主管理と事業者間の共通の目標・基準の設定（ATENA/JANSI）、国産化（サプライチェーンの不安からくる消耗部品・機器設備の確保など、RI 利用の観点（利便性、利用の拡大）からの RI 製造）、甲状腺がん健診の在り方、革新炉の選択、事故耐性燃料開発、内部脅威（核セキュリティ）への対策、安全文化の評価（組織文化の有効性確認）の方法

(2) 選択科目Ⅱ

選択科目Ⅱについては、Ⅱ-1 とⅡ-2 を合わせて、その傾向を探ってみよう。

平成 31（2019）年度 技術士試験の概要 《(1)「選択科目Ⅱ」についての専門知識に関するもの》

概 念	「選択科目」における専門の技術分野の業務に必要で幅広く適用される原理等に関わる汎用的な専門知識
出題内容	「選択科目」における重要なキーワードや新技術等に対する専門知識を問う。
評価項目	技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）のうち、専門的学識、コミュニケーションの各項目

平成 31（2019）年度 技術士試験の概要 《(2)「選択科目Ⅱ」についての応用能力に関するもの》

概 念	これまでに習得した知識や経験に基づき、与えられた条件に合わせて、問題や課題を正しく認識し、必要な分析を行い、業務遂行手順や業務上留意すべき点、工夫を要する点等について説明できる能力
出題内容	「選択科目」に関係する業務に関し、与えられた条件に合わせて、専門知識や実務経験に基づいて <u>業務遂行手順</u> が説明でき、 <u>業務上で留意すべき点や工夫を要する点等についての認識があるか</u> どうかを問う。
評価項目	技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）のうち、専門的学識、 <u>マネジメント</u> 、コミュニケーション、 <u>リーダーシップ</u> の各項目

上記の表題を見る限り、Ⅱでは、問題解決能力及び課題遂行能力が評価されるように見えない。しかし、Ⅱ-2 では実際に出題の中で業務遂行手順が問われるため、リーダーシップやマネジメントと関連付けて業務遂行能力が評価されている可能性がある。

問題文を良く読むと、設問の仕方に求めている解答、コンピテンシーの特徴が現れているように思われる。

Ⅱ-1 については、従来より各選択科目で 4 つの設問から 1 つを選んで解答する形式で出題されている。いずれの設問も説明を求めるような設問であるが、「単純な用語の説明」の場合のほか、「役割」、「重要なポイント」、「具体的運用例」、「留意点」、「現状」、「効果的運用」、「～の観点から」、「性能」、「従来との比較」、「種類」、「原因と対策」、「概念」、「効果」、「有害度の変化」、「原料と製品」、「方法と期待される効果」、「理由」、「簡潔に」のように、解答する範囲や述べ方に関して要求が加えられたような問われ方をする場合も多い。こうした限定したような記述が求められるため、その対策を考えておく必要がある。やや深い専門知識が身につけていることを示すためには、知識を収集し整理しておく段階で、こうしたキーワードを意識した体系的整理をしておきたいところである。

Ⅱ-1 は基本的には説明を求められている。原子力百科事典 ATOMICA、原子力白書等の現状や課題が整理されているものは、伝え方、記載のボリューム、伝える内容の深さを考慮する上で参考にできる。

ただし、各選択科目は統合された関係であるので、その科目に該当する知識の範囲はかなり広く、全てを把握、整理することは困難である。4 つの設問から 1 つを選ぶことを考えて、ある程度の範囲をカバーする程度で整理しておけば、全ての範囲をカバーする必要はなくなる。なるべく広い範囲をカバーしておく方が良いのは当然であるが、自らの専門知識、専門分野から説明できる範囲を徐々に広げるようなイメージで、知見を積み上げていくような学習方法で問題ない。

情報の収集、体系化をする前に、必要な専門知識が身についているかどうか、自分で確認しておくことと良い。その方法としては、得意そうな分野の問題について、過去問のどれか取り上げ、何も資料を見ずに、一度解答案を作成してみると良い。経験や知識があっても意外と書けないと感じる方が多いと思う。合格者の体験を聞くと、こうしたアウトプット学習が有効であった者が多いので、勉強法に悩んでいる者があれ

ば、一つのヒントにしてもらいたい。

一方、Ⅱ-2 では、業務遂行を問われる形が多く、類似業務の進め方が適用できるような実務経験がないと解答が難しいと感じられる設問が多い。また、4 問から選択すれば良いⅡ-1 と異なり、Ⅱ-2 では、2 設問から 1 つを選ぶことになるため選択肢が少ない。また、Ⅱ-1 で求められる資質・能力に加えて、マネジメント、リーダーシップの資質・能力を示すことが求められている。ただし、こうした問題に即した業務経験のある者の方がレアケースであり、その意味で自らの類似の業務経験（手順が類似するもの）から進め方や留意点を挙げる应用能力が問われているものと理解しておけば良いだろう。必須問題同様、過去の出題キーワードを選択科目ごとに整理し、以下に示す。

～「原子炉システムの設計及び建設」関連（上段）／「原子炉システムの運転及び保守」関連（下段）～

設問	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020	R3/2021	R4/2022	R5/2023
Ⅱ-1-1	炉心設計における核、熱、機械的制限事項 実用発電炉の運転管理（保安規定）	原子炉制御室 倍化時間と添加反応度の関係	原子力災害対策特別措置法	原子力発電所の安全目標	原子炉の反応度に影響を与える核分裂生成物	放射線検出器の動作モードと適用例	ドップラー効果の断面積への影響と原子炉における役割
Ⅱ-1-2	原子炉構成材料の選定 臨界近接の手法の原理	軽水炉以外の原子炉の冷却材 使用済核燃料の保管・貯蔵	トリチウムの原子力発電所内管理	原子炉圧力容器鋼材の照射脆化と構造健全性評価	安全機能の重要度分類	新型炉の崩壊熱除去システムに自然循環を適用する際に考慮すべき事項	基準地震動の設定に係る地震、地盤の考慮にかかるポイント
Ⅱ-1-3	安全保護回路の要件 PWR/BWRの一次冷却水の水化学管理	高燃焼度化 廃止措置計画の申請に必要な説明書	原子炉の反応度測定法	原子炉施設における個人の信頼性確認制度	原子炉施設のコンフィグレーション管理 (CM)	事故耐性燃料の特徴と課題	原子力発電所におけるBQ管理
Ⅱ-1-4	ナトリウム冷却高速炉の安全上、システム上の特徴 実用発電用原子炉の運転期間延長	フィルタベント装置 国際原子力・放射線事象評価尺度	軽水炉の経年劣化と保守管理	原子炉施設の廃止段階における安全確保	配管溶接継手の疲労割れ	応力腐食割れの種類、発生機構・原因及び防止対策	負荷追従運転方法
Ⅱ-2-1	新設プラント計画時の被ばく低減計画 既設原子炉施設の再稼働のための設置許可変更	内部溢水評価の手順 重大事故等対処設備の工事計画	リスク情報を活用した意思決定 (RIDM)	原子炉施設における火災防護	特定重大事故等対処施設の基本設計	試験研究用原子炉の新設に係る許認可取得	許認可対象製品の品質管理（製作ミスへの対応）
Ⅱ-2-2	1F事故の教訓を踏まえた電源喪失に対する耐性向上 事業者の自主的な安全向上における外部レビュー	使用済燃料貯蔵槽からの放射性物質放出防止・緩和 状態監視保全方式の導入手順	廃止措置実施方針	是正処置プログラム (CAP)	既設原子炉設備の再稼働のための試験・点検計画	発電用原子炉の設備利用率向上	高サイクル熱疲労による配管・機器の損傷防止

～「核燃料サイクルの技術（及び放射性廃棄物の処理・処分）」関連～

設問	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020	R3/2021	R4/2022	R5/2023
Ⅱ-1-1	商用再処理施設で製造されるガラス固化体	PWRとBWRの軽水炉ウラン燃料の差	ウラン資源の利用から高レベル処分までの概要	ウラン濃縮の目的、原理、手法、装置構成	計量管理におけるMUF	高レベル放射性廃液のガラス溶融炉	わが国の核燃料サイクル（ウラン資源利用の観点）
Ⅱ-1-2	MOX燃料製造施設の安全上の留意事項	核不拡散の実現に向けた保障措置	燃料製造段階における燃料破損防止対策	使用済燃料の中間貯蔵の方式	ウラン濃縮の前段階で行われる転換工程	核燃料物質の臨界安全管理	PUREX 法の技術的概要
Ⅱ-1-3	濃縮ウラン製造のコストに影響を及ぼす事項	クリアランス制度	再処理工場の工程フロー	核燃料再処理におけるトリチウムの工程内挙動と環境放出	高レベル放射性廃棄物の処分場建設地の選定	高レベル放射性廃棄物の地層処分	ウラン廃棄物の埋設処分
Ⅱ-1-4	PUREX 法	再処理施設やMOX加工施設等に用いる基準地震動	低レベル放射性廃棄物の区分と処分方法 (L1、L2、L3)	ウラン廃棄物の埋設処分の現状の課題	高レベル放射性廃棄物の核変換技術	ウラン濃縮の性能評価	クリアランス制度を効果的に運用するための留意点
Ⅱ-2-1	現地式運転試験で要求性能未達となったトラブル対応	1F事故の燃料デブリ一時保管施設の概念設計業務の手順	オフサイト環境修復	放射性物質を含む水溶液（汚染水）の吸着剤の性能評価	核燃料サイクル施設の再稼働	使用済燃料の中間貯蔵容器の設計	新規規制基準対応（安全対策工事）
Ⅱ-2-2	1F事故により汚染された廃棄物の埋立処分施設	核燃料施設における排気モニタ指示値異常時の対応手順	低レベル放射性廃棄物の減容処理	計算機による核燃料サイクル施設の安全性解析評価	放射性廃棄物の焼却設備のリプレース	グローブボックス内の分析機器の更新	核燃料施設の新規建設

～「放射線利用」関連（上段）／「放射線防護」関連（下段）～

設問	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020	R3/2021	R4/2022	R5/2023
II-1-1	LET(線エネルギー付与)とRBE(生物学的効果比)	量子ビームを用いた元素分析法	確率的影響と確定的影響、急性障害と晩発性障害の特徴	実効線量などの防護量と実用量についての内容と問題点	中性子とガンマ線の混合場における作業環境測定	放射線障害防止法の改正内容と水晶体の被ばく管理	空气中濃度と表面汚染密度の関係と作業上の留意点
	バイスタンダー効果、適応応答	放射線防護における線量の概念					
II-1-2	農業・食品分野の実用化放射線利用技術	放射線の工業分野での応用	X線、γ線の測定(放射線防護用、吸収線量測定用)の特性の違い	放射線のLET(線エネルギー付与)とRBE(生物学的効果比)	国際貿易における植物検疫処理の放射線照射	放射性同位元素時の摂取量及び被ばく線量評価手法	周辺環境(ガンマ線線量率)の連続モニタリングに用いる検出器の原理と性能
	「計画被ばく状況」「緊急時被ばく状況」「現存被ばく状況」	個人線量計の原理と特徴					
II-1-3	材料の放射線照射効果を調べる装置、方法・原理	放射性同位元素を用いた医療診断・治療技術	滅菌処理に用いられる放射線の種類とその長所短所	農業分野で実用化されている放射線利用技術	ALARAの原則と国際放射線防護委員会の基本原則	中性子とガンマ線の混合場における個人被ばく線量管理	放射線の生物影響に係る酸素、温度、薬剤その他の環境条件が及ぼす効果
	γ線用線量当量(率)サーベイメーターの特性	代表的な核分裂生成核種が環境中にある場合の被ばく					
II-1-4	放射線により誘起される「分解」「架橋」等の化学反応	農業分野における放射線利用技術	核医学診断・治療の具体例と放出される放射線の特徴	放射性炭素年代測定法の原理と測定方法	低線量放射線被曝による発がんリスクのLNTモデルの問題点と採用理由	放射線グラフト重合の実用例	医療器具の放射線滅菌に使用する放射線と留意点
	天然放射線核種による内部被ばく	放射性核種に係る規制免除、クリアランス、規制除外の概念の違い					
II-2-1	α核種を用いたがん治療薬の開発	イオンビーム加速器の選定	最近の法令報告事象、管理不備の例に係る傾向と対策	RI取扱施設における応急措置(けが・病人)と事故(盗難・紛失)の準備と対応	⁹⁹ Moの小型加速器による代替生成方法	原子力・放射線施設の緊急時の被ばく防護管理計画	TATに用いるアルファ線核種の薬剤等への加工から医療機関払出しまでの対応
	気体I-131 漏えい時の作業者の内部被ばく評価	ICRP声明を受けた水晶体の被ばく管理					
II-2-2	放射線による外部からの爆発物・核物質の探査方法	放射性同位元素を用いた植物体内のイメージング技術の開発	放射性同位元素を用いた植物体内のイメージング技術の開発	可搬型高エネルギーX線源を使用した非破壊検査装置の実証試験	放射線障害防止法における下限数値以下の非密封放射性同位元素の実験・実習	工業利用ガンマ線源の電子線形加速器への置き換え	重荷電粒子線を用いた放射線育種
	内包物質不明容器のRIの調査方法	老朽化した小規模RI施設における漏洩、湧水の早期発見					

上記のキーワードをみると、原子炉関係、放射線関係では、説明を求められているテーマに関し、一見すると類問が少ないような印象を受ける。一方で核燃料サイクルについては、それとは逆に類問が多い印象である。出題する側の意図か、作問者の違いによるものなのかは不明であるが、その傾向を踏まえた上で対策を検討すると良いだろう。

原子炉関係については、テーマとして挙げられる事項が、より深い知識の解答を要求している傾向にあるように思える。また、放射線防護関係では原子炉関係同様、より狭く深い知識の解答を要求する傾向に思える。放射線利用の分野では、近年の進歩が目覚ましいことから、放射線利用分野で最新技術の用語が広く問われるようになってきている。

II-2の設問において、もう少し詳細に傾向をみていこう。必須問題同様、過去3年の場面設定、立場などを整理し表に整理してみる。

設問	R3/2021	R4/2022	R5/2023
II-2-1 原子炉	実用発電炉の特定重大事故等対処施設の基本設計の場面を設定し、 電力会社側の設計責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	新たな試験研究炉を設置する計画が立ち上がり、運転開始時期、設計の基本方針が大幅で決定された場面を設定され、 許認可取得業務の総括責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	原子炉施設の認可対象設備製作中の処置でミス(マニュアルにない作業手順で取替)が納品前の社内検査で判明した場面を設定され、 許認可対象設備受注業務の取りまとめ責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求
II-2-2 原子炉	長期停止中の原子力発電所の再稼働に向け規制手続き、改造工事を終えた場面を設定し、 試験・点検計画を遂行させる管理責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	原子力発電事業の安定的運営に高い設備利用率が必要であるとの背景に関する記述の後、 設備利用率向上の具体的方策を検討する立場 での業務遂行に関する解答を要求	高サイクル熱疲労についての国内外プラントでの損傷例の報告がなされていることを受けて対策を講じる場面を設定され、 SMRを含む原子力プラントの構造設計担当者の立場 での業務遂行に関する解答を要求

設問	R3/2021	R4/2022	R5/2023
II-2-1 サイクル	長期停止中の核燃料サイクル施設の運転再開に向け、許可等への対応が整った場面を設定、職員の移動・退職、交換部品が入り困難な背景に触れた上で、 運転管理の責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	使用済燃料の中間貯蔵容器の設計を実施する場面を設定し、 当該業務の責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	核燃料施設について新規基準に係る安全対策、補強工事を進めようとする場面を設定し、 工事を担当する技術責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求
II-2-2 サイクル	放射性廃棄物焼却設備のリブレースが必要になった場面を設定し、 更新計画策定の責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	核燃料サイクル施設のグローブボックス内の分析機器の更新計画を検討する場面を設定し、 当該検討グループの責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	新規に核燃料施設を建設する場面を設定し、 施設・設備設計の技術責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求
II-2-1 放射線	Mo-99代替生成法の確立が課題となっている背景に触れ、Mo-99の生産プロジェクトが提案された場面を設定し、 プロジェクト遂行責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	緊急時の被ばく管理に関し、あらかじめ被ばく防護を含めた管理計画を作成する場面を設定し、 防護管理計画作成の責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	TATの技術的背景に触れ、 α 線核種で標識された薬剤の開発製造及び供給を確立する場面を設定し、薬剤加工から医療機関等搬出までの施設の 放射線管理計画立案の責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求
II-2-2 放射線	放射線障害防止法改正（下限数量）が改正された背景に触れ、法規制外の非密封放射性同位元素を使用した実験を行う場面を設定し、その業務の 担当責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	放射線工業利用に関し、 γ 線源から電子線に変える動きがある背景に触れた上で、放射線による工業プロセスを導入する場面を設定し、その プロセス導入の担当者の立場 での業務遂行に関する解答を要求	重荷電粒子線を用いた放射線育種の技術開発、大型放射線発生装置を用いた放射線育種の 実施・管理のためのプロジェクトチームが設置された場面を設定し、プロジェクト遂行責任者の立場 での業務遂行に関する解答を要求

必須問題と比較すると、立場の設定が細くなされている。受験者にとって、このような業務遂行の立場に合致するような実務経験を有する方が稀かも知れない。このような状況の中、資質・能力に目を向けると、問題解決ではなく、マネジメント、リーダーシップを示すことが重要と考えられる。また、「調査・検討すべき事項」、「手順の列挙」、「留意点」、「工夫を要する点」、「関係者との連携、調整」の順で問われるのが標準的なパターンとなっている。

これらのことを考えると、日々の業務遂行において、計画の立案や設計を始める段階で何を考慮すれば目的を達成できるような意思決定ができるか、自分ならどのように決断していくかということに意識を向け業務全体の流れを把握すること（縦のつながりで考える）、並びに、他の業務やプロジェクトにおいては何を考慮して業務を進めているのか、メーカから見た原子力事業者の考え方（ニーズ）、事業者から見るメーカに求めていること（要求事項とそれへの対応）を気にすること（横ぐしの視点で考える）といった、業務に当たる姿勢が試験対策として役立つと考えられる。

また、必須問題と同様、答案を実際に作成する練習は必須である。練習にあたっては、適切な答案となっているかどうかについて、身近に技術士の方がいらっしゃれば、その方に添削してもらうことが有効と思われる。身近にいない場合は、読みやすさ、理解できるかなど周りの方に読んでもらうと良い。示すべき資質・能力が表現できているか、知識や実務経験が活かされた記載となっているかについては、自問自答を繰り返し、答案を良く練ってみてほしい。

参考のため「今後の技術士制度の在り方について」に記載されているリーダーシップ、マネジメントに関する事項を記載しておくので、自問自答の際に活用してほしい。

【リーダーシップ】

- ・ 業務遂行にあたり、**明確なデザインと現場感覚**を持ち、**多様な関係者の利害等を調整**し、取りまとめに努めること
- ・ 海外における業務に携わる際は、一定の語学力による業務上必要な意思疎通に加え、現地の社会的文化的多様性を理解し関係者と可能な限り強調すること

【マネジメント】

- ・ **業務の計画、実行、検証、是正（変更）等の過程**において、品質、コスト、納期及び生産性とリスク対応に関する**要求事項**、又は**成果物**（製品、システム、施設、プロジェクト、サービス等）に係る**要求事項の特性**（必要性、機能性、技術的実現性、安全性、経済性等）を満たすことを目的として、人員・設備・金銭・情報等の**資源を配分**すること

ここには掲載しないが、他の資質能力（コンピテンシー）についても、「今後の技術士制度の在り方について」を熟読し、理解しておいてもらいたい。

(3) 選択科目Ⅲ

最後に選択問題Ⅲに関し、傾向を探ってみる。

平成 31（2019）年度 技術士試験の概要 《「選択科目Ⅲ」についての問題解決能力及び課題遂行能力に関するもの》

概 念	社会的なニーズや技術の進歩に伴い、社会や技術における様々な状況から、複合的な問題や課題を把握し、社会的利益や技術的優位性などの多様な視点からの調査・分析を経て、問題解決のための課題とその遂行について論理的かつ合理的に説明できる能力
出題内容	社会的なニーズや技術の進歩に伴う様々な状況において生じているエンジニアリング問題を対象として、「 <u>選択科目Ⅲ</u> 」に <u>関わる観点から課題の抽出</u> を行い、 <u>多様な視点からの分析</u> によって問題解決のための手法を提示して、その遂行方策について提示できるかを問う。
評価項目	技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）のうち、専門的学識、問題解決、評価、コミュニケーションの各項目

選択科目Ⅲにおいて、評価される資質・能力、出題内容は必須問題と類似するが、出題の範囲が選択科目の範囲となることに加え、「多様な視点からの分析による問題解決手法の提示」という表現になっていること、資質能力に技術者倫理が含まれていないことの2つが異なる。

選択科目Ⅲにおいても（1）課題抽出、（2）解決策、（3）将来的懸念事項と対策の流れで問われている。これは、必須科目Ⅰの（1）～（3）と同じであり、出題パターンを意識して考えをまとめる練習をしておくといえよう。今のところ、上表に記載のある「多様な視点からの分析」というような問われ方はされていないが、令和4年度、令和5年度の試験問題では、その理由に対する見解を求められていることがその部分に相当するものと理解できる。課題や解決策は、複数挙げることを求められる。その列挙や重要なものの選定にあたっては、視野が狭いものや、単一の視点にならないように注意を払いたいところである。

他の問題同様、実際に出題された問題でテーマとして求められた事項について、過去問の推移をみてみよう。

～「原子炉システムの設計及び建設」関連（上段）／「原子炉システムの運転及び保守」関連（下段）～

設問	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020	R3/2021	R4/2022	R5/2023
Ⅲ-1 原子炉	軽水炉のプラント熱効率の改善方策	新設発電用原子炉施設における核セキュリティを考慮したシステム設計	小型モジュール炉開発を考慮した軽水炉の革新的安全性向上	現行規制基準に基づく既設炉の安全性向上対策の課題と次期炉への反映	原子炉施設の防護区域内における作業効率とセキュリティの堅牢性	新設軽水炉のSA緩和設備の開発	発電所設備（安全系ポンプ等）の消耗部品に係る製造メーカー撤退への対応
	プラントの停止状態が続く状況からの運転保守の人材確保（R1必須科目に類似）	原子炉の運転・保守に係る品質マネジメントシステム（QMS）					
Ⅲ-2 原子炉	リスク情報を活用した実用発電炉の安全確保	新設発電用原子炉施設における溶融炉心の冷却設備の設計	規制検査見直し（使用前事業者検査）	実用発電炉の運転中保全の導入の課題	実用発電炉の重大事故等施設の保全計画	実用発電炉の運転期間延長	GX基本方針に係る次世代革新炉建設
	1F事故での原子炉制御室及びオフサイトセンターの問題点	原子力事業者等に対する検査制度改正					
Ⅲ-1 サイクル	六ヶ所再処理工場の新規制基準適合の設計基準と重大事故対策及び安全性向上	日本の核燃料サイクル技術の現状と今後のあり方	1F事故に伴うオンサイト、オフサイトの廃棄物処理・処分	クリアランス制度の効率の実現のための課題	プルトニウム需給バランスの確保	核燃料取扱施設の廃止措置	核燃料サイクルと放射性廃棄物の処理・処分の課題への対応
Ⅲ-2 サイクル	我国の使用済燃料の再処理シナリオ、直接処分シナリオ	使用済燃料の冷却貯蔵期間が核燃料サイクルに及ぼす影響	核燃料施設へのIoT、AI取組み	ロボット等、高度制御機械装置を使用する場合の課題	中間貯蔵施設における除去土壌と廃棄物の処理・貯蔵	原子力施設の核セキュリティ対策	原子力人材不足への対応（核燃料施設運転管理）
Ⅲ-1 放射線	食品への放射線照射	海底に残留したCs137の系統的な放射能測定計画の立案	非密封放射性同位元素の使用計画	放射性同位元素の使用施設／大規模研究用加速器施設の緊急事態への対応	放射線発生装置の導入計画から廃止措置の実施・終了までの対応	放射線防護の観点での放射線発生装置の導入計画から廃止措置の実施・終了までの対応	原子力事故を想定したヨウ素131の放射線防護対策と被ばく線量推定
	人工、天然核種の我が国のクリアランスレベル	1F事故で発生した汚染土壌の処理					
Ⅲ-2 放射線	人文科学分野での放射線利用	粒子線がん治療普及に対する技術的課題の検討	食品照射に係る課題	国内外の中性子源の利用状況と課題	治療専用加速器駆動型BNCT施設の設定	電子機器の放射線耐性評価と管理	放射線を用いた物質・材料開発、分析施設の利用
	放射線の取扱いで被ばくする作業者の多い業種と作業内容	管理区域内におけるRF飛散事故時の措置					

出題されているテーマは大きく変化しているようには見えない。革新炉、加速器利用などは最新の技術開発、検討状況、動向を把握しておくことが必要と思われる。核燃料サイクルに関しては、比較的広い範囲で解答可能なテーマが選ばれている印象がある。

他の設問同様、もう少し詳細に傾向をみていこう。過去3年の場面設定、立場などを整理したものを下表に整理してみる。

設問	R3/2021	R4/2022	R5/2023
Ⅲ-1 原子炉	IRRSフォローアップミッションの状況に触れ、作業効率とセキュリティのトレードオフの関係性を述べた上で原子炉施設防護区域内での保守点検の場面を設定し、 <u>施工管理を行う技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	1F事故から新規建設する軽水炉のシビアアクシデント緩和機能の強化を目的とする安全設備の具体化を目指し、必要機能と実現手段の開発に関する新たな提案を行う場面が設定され、 <u>技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	運転開始から30年経過、ポンプ消耗部品のメーカ撤退で供給が受けられなくなった場面が設定され、 <u>技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求
Ⅲ-2 原子炉	重大事故対処等の機能に対する法令要求に触れた上で、 <u>保全計画を立案する技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	原子炉の運転期間の原則40年と20年延長に関する法律に触れ、運転期間延長を検討する立場になったとの場面を設定し、 <u>技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	GX実現に向けた基本方針が引用され、次世代革新炉への建て替えが求められる背景に触れ、次世代革新炉を新規建設する場面が設定され、 <u>原子力分野の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求
Ⅲ-1 サイクル	プルトニウム保有（需給バランス）の必要性について原子力委員会文書を引用し、背景に触れた上で核燃料サイクル施設稼働後の場面を設定し、 <u>核燃料サイクル及び放射性廃棄物の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	ウラン濃縮、再処理等の核燃料取扱施設の廃止措置の解体撤去に伴う大量の放射性廃棄物の発生の想定、法令で廃止措置の終了には廃棄が終了していることが求められていることに触れた上で、 <u>核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	エネルギー基本計画を引用し原子力発電の電源構成の記載に触れた上で、核燃料サイクルの様々な場面で課題があることに触れた上で、 <u>核燃料サイクル及び放射性廃棄物の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求
Ⅲ-2 サイクル	1F事故による汚染廃棄物の中間貯蔵問題の背景、関係法令の内容に触れた上で、現在の状況を踏まえ、 <u>放射性廃棄物の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	核物質防護に関する条約、関係法令に触れた上で、 <u>原子力施設における核セキュリティを担当する技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	高齢化の進展からベテラン技術者の定年と若手の原子力人材の不足に関する問題の背景に触れた上で、 <u>核燃料施設の運転等の管理の中核の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求
Ⅲ-1 放射線	小型の放射線発生装置の導入場面を設定し、導入から廃止までの課題について、 <u>技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	加速器の設置で地下設置が有力な選択肢であることに触れた上で、大型放射線発生装置を導入する場面を設定し、導入から廃止までの課題について、 <u>放射線防護の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	事故時の放射性物質の環境放出の困難さに触れた上で、ヨウ素131の放射線対策と被ばく線量の推定を計画・実施する場面を設定し、 <u>放射線防護の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求
Ⅲ-2 放射線	加速器駆動型BNCT施設の設置が求められている背景に触れた上で、当該施設の普及について、 <u>技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	半導体デバイスの高性能化で放射線の影響評価が重要になっている背景に触れた上で、 <u>電子機器の放射線耐性の評価と放射線環境下での管理を担当する技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求	放射光や中間子等の電磁波、粒子線を用いた分析報道が増加している背景に触れた上で、物質・材料の分析施設の受入責任者として相談を受けた場面を設定し、 <u>放射線利用の技術者の立場</u> での課題解決の提案に関する解答を要求

上記の表をみると選択科目ごとに立場の設定に係る傾向がバラバラで、それぞれが特徴的な状況となっている。

原子炉では令和4年度、令和5年度と立場の設定が限定的ではなくなってきた。核燃料サイクルでは、2つの設問の内、1つは限定されないものとして、1つが分野を限定した形で出題されているので、この傾向が続くようであれば、この2つの科目については、過去の問題や時事問題を参考に選択科目全般に係る課題について予め考えることを整理しておけば、解答は可能であろう。

一方、放射線関係については、令和3年度は立場を限定していないが、実質、放射線利用側に偏った出題、令和4年度は、加速器の放射線防護と放射線利用の双方の知見を要する問題、機器に対する放射線環境管理のような専門性が高く、状況が限定された出題のように見え、解答が難しかったのではないかと考えられる。令和5年度は、放射線防護の問題、放射線利用の問題と問題文から明確に識別できるような形で出題されている。令和3年度まで、合格率が低い状態が続いていたため、設問の難度の調整を模索しているように思える。今後は、これまでよりも、放射線防護、放射線利用のいずれの技術者であっても解答が可能となるような出題に改善が行われるかもしれない。

いずれにしても、論述できる範囲の専門分野を広げる努力を普段から心がけておきたいところである。

令和5年度技術士第二次試験において出題された各設問に対する解答のポイントを次頁以降に示す。

技術士第二次試験では、決められた枚数の解答用紙内に、自らの知見や経験に基づくコンピテンシーを示しつつ、記入すべきポイントをまとめて書き込むことが求められる。解答のポイントの中に解答例を示したものもあるが、各受験生の知見、経験は異なる。答案作成は自らの経験、知見に基づく内容を含めたものの方が、より説得力がありコンピテンシーを示しやすい。

前述したとおり、解説に記載したポイント（解答例を含む）は模範解答ではなく参考例として捉えてもらいたい。

また、本稿での解説は受験者に多くの情報を与えることを考慮したため、所定の字数制限にとらわれたものとしていない。受験者には、解答用紙に記入すべきポイントを絞り込み、論理立てて記載するスキルも求められるため、試験本番までに答案作成の訓練を行っておくことをお勧めする。

なお、本解説の作成は、関連する分野の技術士が中心となっているが、問題によっては必ずしも直接的業務経験を有する技術士によらない場合もあり、提供する参考情報に濃淡があることを予め、ご了承いただきたい。

【参考文献】

- [1] 平成31（2019）年度 技術士試験の概要について、日本技術士会ホームページ
https://www.engineer.or.jp/c_topics/005/attached/attach_5698_1.pdf
- [2] 「今後の技術士制度の在り方について」
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu7/sonota/1381612.htm
- [3] 令和4年度版 原子力白書
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2023/index_pdf01.htm
- [4] 日本技術士会ホームページ（過去問題）
https://www.engineer.or.jp/c_categories/index02022240.html
- [5] 技術士倫理綱領
https://www.engineer.or.jp/c_topics/009/009289.html
- [6] 技術士倫理綱領への手引き
https://www.engineer.or.jp/c_topics/009/attached/attach_9289_5.pdf

4. 必須科目 I の問題と解説

I 次の2問題(1-1、1-2)のうち1問題を選び解答せよ。(解答問題番号を明記し、答案用紙3枚にまとめよ。)

I-1 令和5年2月10日に閣議決定された「GX実現に向けた基本方針」では原子力の活用が謳われており、同月20日に原子力委員会で改定が決定された「原子力利用に関する基本的考え方」(以下「基本的考え方」という)ではより具体的な方針が明確にされている。基本的考え方では、重点的取組の「国際協力の下で原子力の平和利用及び核不拡散・核セキュリティの確保等を進める」の項において、利用実態のない放射性物質について集約管理を実現するための具体的な方策について必要な検討をすべきであると述べている。

上記の状況を踏まえて、以下の問いに答えよ。

- (1) 利用実態のない放射性物質の集約管理を実現するに当たり、技術者としての立場で多面的な観点から3つの課題を抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、その課題に対する複数の解決策を、原子力・放射線部門の専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示したすべての解決策を実行して生じる波及効果と専門技術を踏まえた懸念事項への対応策を示せ。
- (4) 前問(1)～(3)の業務遂行に当たり、技術者としての倫理、社会の持続可能性の観点から必要となる要件・留意点を題意に即して述べよ。

【解答のポイント】

問題文中で示されている「原子力利用に関する基本的考え方」について、概要を把握しておくとか何を話題にしているのかを把握しやすい。

「核不拡散・核セキュリティの確保等」というキーワードがあることから、利用実態のない放射性物質の集約管理としては、主に余剰プルトニウム問題(使用済燃料が増え続けていること等)を中心とした答案構成を求めた問題(題意)と捉えるのが自然である。

選択科目が、原子炉システム、核燃料サイクル分野であれば、そうした視点から解答すれば良いが、放射線分野の方には少し解答が難しいかもしれない。この基本的考え方の中では、「加えて、利用実態がなく保管だけされている放射性物質が全国の多くの民間又は公的な事業所等に分散して存在しており、法令上の管理下でない放射性物質が発見される例も多数あることから、安全上及び核物質防護上のリスクの顕在化が懸念される。これらのリスクを低減させるため、このような放射性物質の集約管理を実現するための具体的な方策について、関係行政機関、JAEA等が連携・協力して必要な検討をすべきである。」との記載がある。どうしても余剰プルトニウム問題に関して記載できないということであれば、そのような切り口で答案構成をすることも考えられる。

ここでは、一般に課題と捉えられるであろう項目について、キーワードを挙げておく。

- 1) 集約した場合にテロ行為のターゲットとなる可能性が高まる(核セキュリティの管理の視点)。
- 2) 余剰プルトニウムを保有することに関して、国際的には核兵器への転用に関する疑念を持たれないよう、管理を厳格にする必要がある(保障措置の視点)。
- 3) 集約、貯蔵の状況等に関する情報の取扱いに関することと、それに対する地元、国民の理解を得ることの両立(情報管理の視点)
- 4) 多くの放射性物質を取扱うことに伴う放射線管理に関すること(放射線管理の視点)
- 5) 集約を計画、管理する立場から、集約した使用済燃料の保管管理の方法(乾式貯蔵・湿式貯蔵の選択、貯蔵中の安全管理等)
- 6) 集約行為に対する制限的な事項。中間貯蔵施設、発電所敷地内に保有されている使用済燃料の管理の方法に関する事項。例えば、中間貯蔵施設でどの位受入れることを可能とするのか、制限を設けるのか、燃料としての再利用のための搬出の計画とのバランスについてどのように考えるのか、といった視点(プルトニウムバランスの視点:再処理からMOX燃料製造の実現とプルトニウム消費/エネルギー需給のバランス管理)
- 7) 集約管理中の核種組成の変化に対する影響と対策(アメリシウム241の生成、蓄積等による再処理、燃料加工の実施への影響の評価、再処理/MOX燃料製造の実施時期を含めた計画管理、関連する安全対策の検討・充実のようなこと(集約した以降の対応への配慮の視点)
- 8) 原子炉システムとしての関連対応。プルサーマル運転の拡大、プルトニウム専焼炉、マイナーアクチノイドの燃焼による処分負荷の軽減(プルトニウムその他の超ウラン元素低減化の促進)のような対処の促進、関連する安全対策の充実。(集約した以降の対応への配慮の視点)
- 9) 不要な放射性物質を放射性廃棄物とし、放射性廃棄物管理の確実な実施、放射性廃棄物の処分を促進すること(集約した以降の対応への配慮の視点)

なお、設問(1)では、多面的な観点からの抽出を求められているため、なるべく挙げた項目が広い視点を持っている印象を持たれるようなものを挙げておく方が無難である。上記の他にも、「原子力利用に関する基本的考え方」には人材育成の強化等のキーワードが上げられている。設問(2)では、最も重要と考えられる事項を選定することになるため、それを踏まえて、題意を外さない程度で、自分と専門分野に近いところの課題を選定し、以降の論理展開をすることで自らのコンピテンシーを示すことを考えると良いだろう。

参考文献を以下に示すので、これらの文献を参考に自分なりの解答案を作成してみたい。

なお、設問(3)をみると「すべての解決策を実行して…」とあるので、ここで想定している解決策は各対策が相反するようなものではなく、同時に実施しうるものと考えるのが自然である。したがって、選んだ課題に関して細かく技術的対策を提案することが難しいようであれば、「安全性を考慮した貯蔵管理方法の確立」のような課題を選んでおき、貯蔵方式の選択、それに伴う放射線管理、核セキュリティ対策などの関連する技術的事項に関する対策を挙げて、答案を構成することが可能と考えられる。

設問(4) 技術者倫理、社会の持続可能性の観点からの要件、留意点については、住民、国民の理解を得ることや、将来に渡って問題とならないように集約管理した放射性物質をどのように処理していくかなどに着目し、公益確保の観点から技術者として果たすべき役割、責任を意識した解答にできると流れのある、視点の広さを示した答案になる。

【参考文献】

- [1] GX 実現に向けた基本方針～今後 10 年を見据えたロードマップ～、令和 5 年 2 月
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf
- [2] 原子力利用に関する基本的考え方、原子力委員会、令和 5 年 2 月 20 日
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/kettei230220.pdf>
- [3] 令和 4 年度版原子力白書、原子力委員会、令和 5 年 7 月
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2023/zentai.pdf>
- [4] 使用済燃料対策に関するアクションプラン
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/shiyozumi_nenryo/pdf/001_01_00.pdf
- [5] 令和 3 年度原子力の利用状況等に関する調査（核燃料サイクル技術等調査）報告書、三菱総合研究所
https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2021FY/000464.pdf
- [6] 原子力百科事典(ATOMICA)06-01-05-08 「使用済燃料の乾式貯蔵に関する研究」、06-01-05-14 「使用済燃料中間貯蔵技術」
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_06-01-05-08.html
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_06-01-05-14.html
- [7] リサイクル燃料貯蔵センター関係情報（ホームページ）
https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kikikanri/bosaikikikanri/files/3lkai_shiryoul-3.pdf
<https://www.jilc.or.jp/files/libs/391/202009241041514838.pdf>
https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/whats/pdf/cycle_pamphlet.pdf
- [8] RI 研究所等廃棄物関係情報（ホームページ）
https://www.jrias.or.jp/waste/pdf/haikibutsu_shuka2018.pdf
https://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/info/pdf/jaea2022_004.pdf
<https://www.mhlw.go.jp/content/10801000/000796662.pdf>

【類似問題】

- ・ R1 年度（2019 年度）核燃料サイクルⅠ-2
- ・ R2 年度（2020 年度）核燃料サイクルⅡ-1-2
- ・ R4 年度（2022 年度）核燃料サイクルⅡ-2-1

I-2 原子力施設や放射線施設の運転管理、放射線管理、廃止措置、放射性廃棄物の管理等に関連して多種多様な放射線（能）の測定や分析（以下「放射線測定等」という）が行われている。また、東日本大震災を契機に、環境放射線モニタリングや食品等に含まれる放射性物質の測定など、原子力災害の経験を踏まえた新たな放射線測定等の開発適用が進むとともに、放射線測定等の結果が社会的にも広く利用されるようになった。

これらの放射線測定等においては、法令に適合することが必要なものがあり、また、最近の動向としては、「放射線の量等の測定の信頼性確保のための放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の一部を改正する規則」が公布され、令和5年10月から施行される。

このように、放射線測定等が原子力・放射線利用の発展と社会の安全・安心を支える基盤となっており、その一部については信頼性の確保に係る規制要求が設けられるなど、放射線測定等における信頼性の確保がより一層強く求められている。

上記の状況を踏まえて以下の問いに答えよ。

- (1) 放射線測定等の設計・開発あるいはサービスの提供を新たに行うとした場合に、その具体的な事例を挙げて、技術者としての立場で多面的な観点から3つ課題を抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、その課題に対する複数の解決策を、原子力・放射線部門の専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示したすべての解決策を実行しても新たに生じうるリスクとそれへの対策について、専門技術を踏まえた考えを示せ。
- (4) 前問(1)～(3)の業務遂行に当たり、技術者としての倫理、社会の持続可能性の観点から必要となる要件・留意点を題意に即して述べよ。

【解答のポイント】

設問に出現する以下の項目（キーワード含む）について、概要及び放射線測定等における要求事項を理解した上で各問に解答することが望ましい。それぞれの放射線測定等については、その目的を踏まえ、放射線測定機器、測定方法、測定対象等を適切に選定し実施する必要がある、以下に示す指針、計画及びガイドに基づき実施されている。また、放射線測定等の開発について解答の参考として、背景となる情報、考慮すべき事項の例等を示す。

○原子力施設や放射線施設の運転管理、放射線管理、廃止措置、放射性廃棄物の管理等に関連して多種多様な放射線（能）の測定

通常の施設管理等にあたっては、施設の異常、放射線作業時の被ばく低減、平常時の法令基準値や許認可で定めた放出基準などを監視し、それを遵守、低減するための測定が求められる。その測定方法に関しては、「放射線モニタリング指針」（一般社団法人 日本電気協会）において、放射線モニタリングの考え方や推奨される方法が定められている。この指針には、原子力施設等における放射線業務従事者、発電所等の管理区域に一時的に立ち入る者及び発電所等周辺の一般公衆が、運転に起因して受ける線量を合理的に達成できる限り低く管理するための具体的な項目として、プロセス放射線モニタリング、エリア放射線モニタリング、放出管理モニタリング、管理区域内放射線モニタリング、周辺監視区域境界近傍放射線モニタリング、環境放射線モニタリング、校正及び点検等について基本的な事項が規定されている。

○東日本大震災を契機とした、環境放射線モニタリングや食品等に含まれる放射性物質の測定など

東京電力株式会社（現：東京電力ホールディングス株式会社）福島第一原子力発電所事故においては、食品中に含まれる放射性物質の量、居住環境、その他の流通物品など、一般の方々に正確な情報を迅速に提供することが求められた。不正確な測定、信頼性の低い測定が行われた場合、その数値が独り歩きし、風評被害など大きな社会的影響を及ぼす可能性がある。政府は原子力災害対策本部のもとにモニタリング調整会議を設置するとともに「総合モニタリング計画」を策定し、きめ細かな環境放射線モニタリングを確実に、かつ計画的に実施できるよう、モニタリングの対象、情報集約・発信、実施主体の分担、実施内容及び実施体制等を明確、具体化しつつ対応してきた経緯がある。

○原子力災害の経験を踏まえた新たな放射線測定等の開発適用

福島第一原子力発電所の事故直後から、様々な測定対象についての測定が必要となった。土壌中の濃度、地図上の位置と汚染、線量の関係、川底、森林、食物、瓦礫、自動車、建物内等々、平常時には余り測定がなされていない対象も多く含まれた。こうした中、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」を踏まえて、日本原子力研究開発機構などを中心に、国内外の大学、研究機関、産業界等の人材が交流できるネットワークを形成しつつ、産学官による研究開発と人材育成等を含め、国の英知を結集して環境修復、廃止措置プロジェクトが進められる体制が構築されており、放射線計測技術の開発が行われている。

○「放射線の量等の測定の信頼性確保のための放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の一部を改正する規則」（令和5年10月から施行）

放射線計測器（サーベイメータ等）の校正義務について、2016年1月に報告された国際原子力機関(IAEA)の総合規制評価サービス(IRRS)の勧告を受けて、2020年9月に、放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則（以下、RI法施行規則）の一部改正が公布された。放射線測定の信頼性確保については、これまで、事業者や測定サービス会社等の自主的な取組みに委ねられていたが、RI法施行規則の改正により、事業者が責任を負うことが明確化された。放射線測定器（サーベイメータ等）においては、改正されたRI法施行規則では、「測定に用いる放射線測定器に

ついては点検及び校正を1年ごとに適切に組み合わせて行うこと」と明記されたため、事業者が責任をもって放射線測定器（サーベイメータ等）の点検及び校正の実施が必要とされている。

○放射線測定等における信頼性の確保

放射能及び放射線を正しく測定するためには、測定器の正確性のみならず、測定方法の適切性を確保することが重要となる。このため、関係省庁や公的機関では以下に例示するとおり、種々のガイドライン等を定めている。

(1) 食品等の放射能測定

- ・文部科学省：「放射能測定法シリーズ」（外部リンク。日本分析センターのページ）
- ・厚生労働省：「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」（外部リンク。厚生労働省の「東日本大震災関連情報」のページ。ページ下部の「試験法について」の項にマニュアルと関連通知あり。）

(2) 環境中の放射線

- ・文部科学省・日本原子力研究開発機構：「放射線測定に関するガイドライン」
- ・一般社団法人日本電気計測器工業会「簡易な環境放射線測定に関するガイドライン」
- ・一般社団法人日本電気計測器工業会：「放射線測定機器の性能チェックシート」

(3) 廃棄物、除染関係

- ・環境省：「廃棄物関係ガイドライン」、「除染関係ガイドライン」

(4) 工業製品

- ・一般社団法人日本電気計測器工業会：「工業製品の放射線汚染を確認するための一次的な測定方法のガイドライン」

上記のような背景を考慮し、受験者が自ら事例であげた測定と関連づけるような形で論述できると良い。例えば、多種多様な測定対象物（対象核種を含む）への対応、使用環境（極限状態、遠隔測定等）、迅速性、測定精度、信頼性確保、品質保証、運用のしやすさ（汎用性／操作性、使いやすさ）、メンテナンス性（点検、校正、修理等）、社会の持続可能性、分かりやすい説明など。

一方、測定機器を開発、測定方法が確立された場合であっても、使い方や測定結果に誤解のようなものがあれば、測定値が信頼できないものとなり、影響が大きい（リスクがある）。

放射線計測における課題やリスクについて、専門技術用語を用いて説明することが求められるため、本問の要求に耐えうる答案とするためには、放射線計測に関する専門用語に対して、解説できる程度の専門知識（例えば、防護量、実用量、統計誤差/幾何学的誤差、方向性線量当量、時定数、自己遮蔽、 β - γ 同時計測法、シンチレータ、各種放射線測定器の名称/種類、クエンチング、イメージング、コンプトン散乱（コンプトンエッジ）、線質放射平衡、ミルキング、飛程、不感時間、内部標準/外部標準、ファントム等）が必要となる。

○技術者としての倫理

上記の背景に述べたように、放射線測定器は簡易測定も含め、用いられる場面が多様になってきている。そこで、正確に測定できない、信頼性を欠くような測定器が社会に流通するようになった場合、その影響ははかり知れず、大きく公益を損なうこととなる。昨今、企業等の検査データの改ざん等の不適切な事象が発生するなか、不正をしないことはさることながら、誤った測定（使用）が行われないようにすることを含め、注意を払って、測定技術の開発を行う必要がある。

なお、放射線測定等の開発に関しては、デブリに対する測定・分析技術の確立に関する取組みについても参考にと考えられる。日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センターに係るホームページに関連する情報が掲載されているので参照されたい。

【参考文献/参考情報】

- [1] 「放射線モニタリング指針（JEAG4606-2023）」 一般社団法人 日本電気協会
- [2] 総合モニタリング計画 原子力規制委員会 放射線モニタリング情報 <https://radioactivity.nra.go.jp/ja>
- [3] 日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター <https://clads.jaea.go.jp/jp/rd/>
- [4] 公益社団法人日本アイソトープ協会、R4年12月、放射線障害予防規程ガイドの解説書 <https://www.jrias.or.jp/report/cat3/post-2.html>
- [5] 原子力規制庁、R1年12月25日、放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則等の改正の方針 <https://www.nra.go.jp/data/000295983.pdf>
- [6] 経済産業省 放射能測定器及び放射線測定器等の校正→各種ガイドライン https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun/techno_infra/sokuteikikousei.html
- [7] 技術士倫理綱領 https://www.engineer.or.jp/c_topics/009/009289.html
- [8] 技術士倫理綱領への手引き https://www.engineer.or.jp/c_topics/009/attached/attach_9289_5.pdf

5. 選択科目Ⅱの解説

5.1 「原子炉システム・施設」の問題と解答のポイント

Ⅱ 次の2問題(Ⅱ-1、Ⅱ-2)について解答せよ。(問題ごとに答案用紙を替えること。)

Ⅱ-1 次の4設問(Ⅱ-1-1～Ⅱ-1-4)のうち1設問を選び解答せよ。(緑色の答案用紙に解答設問番号を明記し、答案用紙1枚にまとめよ。)

Ⅱ-1-1 核のドップラー効果が入射中性子からみた断面積に与える影響及び当効果の原子炉における役割について述べよ。

【解答のポイント】

<ドップラー効果の概要>

ドップラー効果とは、原子炉内の温度上昇に伴って原子核の熱振動が激しくなり、その結果、共鳴吸収を生じるエネルギーの幅が広がることで共鳴吸収が起りやすくなる効果のことである。

<入射中性子からみた断面積への影響>

入射中性子と原子核との相互作用は、両者の相対エネルギーに関係する。原子炉内の温度上昇に伴い、原子核の熱振動が激しくなることから、中性子のエネルギーは原子核の熱振動に対応した幅を持つ。これを中性子から見ると、原子核の共鳴エネルギー幅が広がることとなる。例として、図1にU-238による吸収断面積の温度依存性を示す。

<ドップラー効果の原子炉制御における役割>

原子炉内の温度が上昇すると、親物質であるU-238などによる共鳴吸収が増加するため、中性子の共鳴を逃れる確率が減少する。すなわち、炉心に負の反応度効果が投入される。この効果は何らかの要因で原子炉の温度が上昇した際に、自動で原子炉出力を低下させるフィードバック効果を有することを意味し、原子炉を制御する上で重要な役割を持つ。

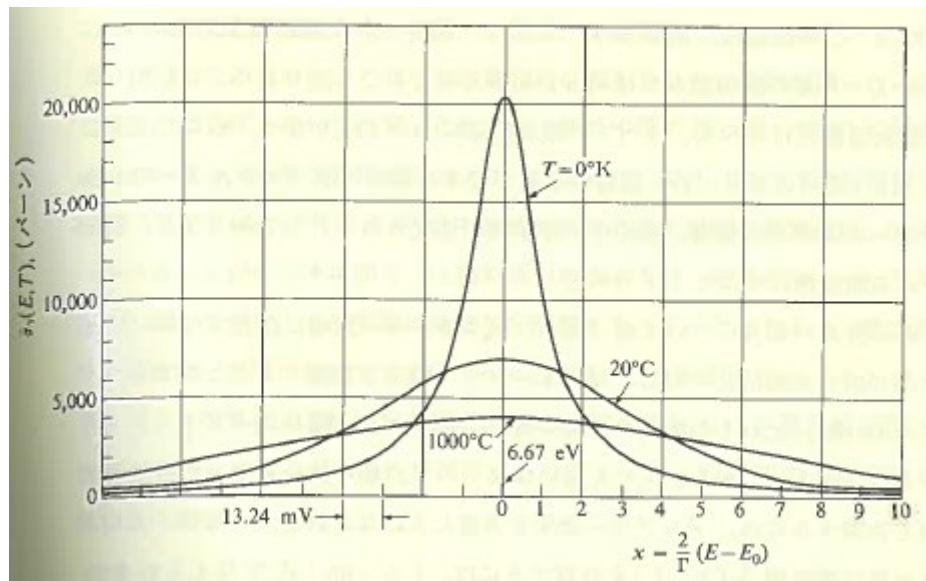


図1：U-238の吸収断面積のドップラー広がり [2]

【参考文献/参考情報】

- [1] 原子力百科事典ATOMICA 「ドップラー効果」
https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1120.html
- [2] ラマーシュ、原子炉の初等理論(上)、吉岡書店、1974

II-1-2 発電用原子炉の建設において設置許可基準規則が求める基準地震動を設定するに当たり、地震や地盤の考慮にかかる重要なポイントを2点挙げてその内容について述べよ。

【解答のポイント】

規制基準での要求事項には多くの項目がある一方で、解答スペースには制限がある。このため、全ての要求事項を解答するのではなく、規制基準で要求されている基本的事項を参考に、そのポイントを解答することが望ましい。

以下は、原子力規制庁が発電用軽水炉型原子炉施設等の審査に用いる「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」等に記載された基本的事項であり、本設問の解答を作成する際の参考となる。

(1) 地震の考慮にかかる重要なポイント

- 1) 基準地震動は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、それぞれ解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動として策定されていること。
- 2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震について、敷地に大きな影響を与えると予想される地震（以下「検討用地震」という。）を複数選定し、選定した検討用地震ごとに不確かさを考慮して、応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価により、それぞれ解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映して策定されていること。不確かさの考慮については、敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて評価すること。

ここで、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震（地震発生様式）については、以下のとおりである。

(ア) 内陸地殻内地震

「内陸地殻内地震」とは、陸のプレートの上部地殻地震発生層に生じる地震をいい、海岸のやや沖合で起こるものを含む。

(イ) プレート間地震

「プレート間地震」とは、相接する二つのプレートの境界面で発生する地震をいう。

(ウ) 海洋プレート内地震

「海洋プレート内地震」とは、沈み込む又は沈み込んだ海洋プレート内部で発生する地震をいい、海溝軸付近ないしそのやや沖合で発生する「沈み込む海洋プレート内の地震」と、海溝軸付近から陸側で発生する「沈み込んだ海洋プレート内の地震（スラブ内地震）」の2種類に分けられる。

- 3) 「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に各種の不確かさを考慮して、敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定されていること。
- 4) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を相補的に考慮することによって、敷地で発生する可能性のある地震動全体を考慮した地震動として策定されていること。

(2) 地盤の考慮にかかる重要なポイント

応答スペクトルや断層モデルによる基準地震動の設定に当たっては、(1)に示したとおり、解放基盤表面（せん断波速度 V_s が、概ね 700m/s 以上の硬質地盤）に深地震波の伝播特性が、適切に考慮されている必要がある。

1) 応答スペクトルに基づく地震動評価における地震波の伝播特性

- (ア) 水平及び鉛直地震動の応答スペクトルは、参照する距離減衰式の特徴を踏まえ、敷地周辺の地下構造に基づく地震波の伝播特性（サイト特性）の影響を考慮して適切に評価されていること。
- (イ) 敷地における地震観測記録が存在する場合には、それらを収集・整理・解析し、地震の発生様式や地域性を考慮して地震波の伝播特性の影響を評価し、応答スペクトルに反映させていること。

2) 断層モデルを用いた手法による地震動評価における地震波の伝播特性（地下構造モデル）

- (ア) 「広域地下構造調査（概査）」と「敷地近傍地下構造調査（精査）」を組み合わせた調査により、地震動評価のための地下構造データが適切に取得されていること。

ここで、概査及び精査とは以下のとおり。

- ① 「広域地下構造調査（概査）」： 敷地からの距離に応じて、地震発生層を含む地震基盤（せん断波速度 V_s が 3000 m/s 程度以上の地層）から解放基盤までを対象とした地下構造調査。
- ② 「敷地近傍地下構造調査（精査）」： 地震基盤から表層までを対象とした地下構造調査。

- (イ) 地震動評価において、震源領域から地震基盤までの地震波の伝播特性に影響を与える「地殻・上部マントル構造」、地震基盤から解放基盤までの「広域地下構造」、解放基盤から地表面までの「浅部地下構造」を考慮して、地震波速度及び減衰定数等の地下構造モデルが適切に設定されていること。

- (ウ) 地下構造モデルの設定においては、地下構造（深部・浅部地下構造）が地震波の伝播特性に与える影響を検討するため、地層の傾斜、

断層、褶曲構造等の地質構造を評価するとともに、地震発生層の上端深さ、地震基盤・解放基盤の位置や形状、地下構造の三次元不整形性、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性が適切に評価されていること。

- (エ) 地震基盤までの三次元地下構造モデルの設定に当たっては、地震観測記録（鉛直アレイ地震動観測や水平アレイ地震動観測記録）、微動アレイ探査、重力探査、深層ボーリング、二次元あるいは三次元の適切な物理探査（反射法・屈折法地震探査）等のデータに基づき、客観的・合理的な手段によってモデルが評価されていること。
- (オ) 特に、敷地及び敷地近傍においては鉛直アレイ地震動観測や水平アレイ地震動観測記録、及び物理探査データ等を追加して三次元地下構造モデルを詳細化するとともに、地震観測記録のシミュレーションによってモデルを修正するなど高精度化が図られていること。

【参考文献】

- [1] 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド、令和4年6月8日 原規技発第2206082号 原子力規制委員会決定
- [2] 敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド、令和4年6月8日 原規技発第2206082号 原子力規制委員会決定

【類似問題】

- ・H30年度（2018年度）核燃料サイクル

II-1-3 原子力発電所におけるEQ (Environmental Qualification) 管理の概要と具体的な運用例について述べよ。

【解答のポイント】

EQ (Environmental Qualification) とは、電機品の寿命末期に（つまり劣化した状態で）設計基準事故が発生し、その環境下に曝された場合でも所定の機能要求時間、機能を維持することを保証し、そのエビデンスを作成・維持することである。

日本ではJEA-4623（原子力発電所の安全系電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針）として定められており、その指針に基づき検証している。

概要を以下に記載するので、受験者自らの経験を踏まえ、具体的に記載することが望ましい。

1. 検証計画の策定

検証計画では以下の項目を明確にし、策定する。

- ① 対象設備
- ② 目標とする検証寿命
- ③ 検証対象とする設計基準事故（検証対象事象）
- ④ 検証対象事象において期待される対象設備の安全機能
- ⑤ 検証対象事象において、対象設備の安全機能が発揮され、維持されるべき期間
- ⑥ 想定される運転条件
- ⑦ 対象設備の検証寿命期間中に想定される保守（部品交換を含む）及び検査
- ⑧ 検証手法

2. 検証

検証には①型式試験、②使用実績、③解析の3つの手法があり、①、②単独か①、②、③を組み合わせ検証する。③解析のみでは設備を検証することはできない。

① 型式試験

対象設備と同等の試験体を使用し、通常運転時の劣化を模擬したうえで、設計基準対象を模擬した試験条件に置く。試験中及び試験前後の試験体が要求される安全機能を維持していることを判定基準によって確認する。

具体的な例としては、難燃ケーブルの絶縁劣化に対し、60年運転した場合に相当する加速熱劣化及び放射線照射に加え、設計基準事故相当の放射線照射や蒸気を暴露させたのち、屈曲浸水耐電圧試験にて絶縁劣化を確認する。

② 使用実績

原則、検証対象設備と同等と評価される設備が検証対象となる運転条件より厳しい条件において安全機能を維持できた場合には、その設備は検証されたといえる。

③ 解析

構造物の物性等の理論的な評価、数値解析等を用いて、検査対象設備がその運転条件において安全機能を発揮し、維持できることを示すことで検証する。

3. 検証寿命の再評価

実際の通常運転時に検証対象設備が設置されている環境条件が、試験計画で想定した環境条件と異なる場合等においては、それに応じた経年劣化を考慮し、検証寿命を再評価する。

具体的な例としては、運転条件として温度を 50℃として劣化処理の条件を決定したが、実際に設置されている場所の温度が 40℃であった場合この 10℃の温度差について検証寿命を再評価する。

【参考文献/参考情報】

- [1] JEAG-4623 (原子力発電所の安全系電気・計装品の耐環境性能の検証に関する指針) 一般社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会
- [2] 中村理恵 海外における電気品の EQ (Environmental Qualification) に関する動向
<https://mainte-archive.cloud/008202>
- [3] ニューシア (原子力施設情報公開ライブラリー) 確認されていなかった安全上重要な機器の照射試験及び耐環境性能保証に関する誤差
項 <http://www.nucia.jp/nucia/kg/KgTroubleView.do?troubleId=278>
- [4] 「高経年化技術評価について」 原子力規制委員会 高経年化した発電用原子炉の安全規制に関する検討チーム (第2回)
<https://www.nra.go.jp/data/000422892.pdf>
- [5] 日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準: 2021 日本原子力学会
- [6] 石井伸弘 電気計装設備 (ケーブル) の劣化影響評価について 日本原子力学会誌、vol. 61、No2 (2019)
- [7] 北海道電力株式会社ほか 原子力発電所の運転期間と機器・構造物の経年劣化影響に関する技術レポート、2018
<https://www.fepc.or.jp/nuclear/other-materials/pdf/20180730.pdf>
- [8] 独立行政法人原子力安全基盤機構 原子力発電所のケーブル経年劣化評価ガイド (JNES-RE-2013-2049)、2014

II-1-4 沸騰水型軽水炉(BWR)あるいは加圧水型軽水炉(PWR)のいずれかについて、太陽光発電からの電力量が増加する昼間に計画的に一定の低出力で運転し、夜から朝にかけては再び定格(100%)出力運転に戻す日負荷追従運転方法を説明せよ。

【解答のポイント】

我が国では、原子力発電は一定の出力で運転されており、負荷変動の追従には短時間の出力制御が容易な火力発電が用いられている。ただし、原子力発電が全体発電量の多くを占めるフランスでは、日常的に原子力発電所の負荷追従運転が行われており、技術的には可能である。原子力発電所の日負荷追従運転の方法は、原子炉出力の制御方法の違いにより、沸騰水型軽水炉(BWR)と加圧水型軽水炉(PWR)で異なる。受験生の馴染みのある炉型を選択し、以下に示す日負荷追従運転方法を解答すると良い。

(1) 沸騰水型軽水炉(BWR)での日負荷追従運転方法

BWRでは、再循環流量制御及び制御棒位置調整により負荷追従運転が可能である。約65%~100%の出力範囲については、再循環流量のみで制御可能であり、それを超える範囲の出力制御は、制御棒を併用して行う。

福島第一原子力発電所3・4・5号機、福島第二原子力発電所2号機及び柏崎刈羽原子力発電所1号機で試験実績がある。(再循環流量制御のみを使用した試験)

(2) 加圧水型軽水炉(PWR)での日負荷追従運転方法

PWRの制御方式はタービン負荷変化に原子炉出力を追従させる方式であり、原子炉の出力制御は炉心の負のフィードバック反応度もしくは制御棒位置の調整により可能である。ただし、制御棒位置の調整により原子炉出力を制御する場合、負荷変動に伴って生じるXeの変化、あるいは燃焼の進展等に伴う緩やかな反応度変化を、1次冷却材中のホウ素濃度を調整することにより調整する。(ホウ素濃度が低くなる炉心寿命末期では、ホウ素濃度の希釈による制御困難から、負荷追従運転は制限される。)

美浜原子力発電所3号機、伊方原子力発電所2号機での試験実績がある。(炉心の負のフィードバック反応度を用いた試験)

【参考文献/参考情報】

- [1] 原子力百科事典ATOMICA 「負荷追従運転」
https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1148.html
- [2] 原子力発電所の負荷追従運転
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesj1959/28/10/28_10_913/_pdf/-char/ja
- [3] 沸騰水型原子力発電所の日間負荷追従運転法の研究
https://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/1980/09/1980_09_07.pdf
- [4] 原発負荷追従運転の問題点
<https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/100/PDF/No30.pdf>
- [5] カーボンニュートラルを支える原子力の持続的活用方策
<https://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20220422/20220422-05.pdf>

Ⅱ-2 次の2設問(Ⅱ-2-1、Ⅱ-2-2)のうち1設問を選び解答せよ。(青色の答案用紙に解答設問番号を明記し、答案用紙2枚を用いてまとめよ。)

Ⅱ-2-1 客先から受注した、原子炉施設における「設計及び工事の計画の認可」の対象となっている設備(以下「認可対象設備」という)を製作中に、図面の読取ミスにより規定値を満足しない箇所が発生したが、現場作業員の判断によりマニュアルにない作業手順で取替を行い規定値に収めたことが、納品前の社内検査中に判明した。当該認可対象設備の稼働予定時期が迫る中で、当該認可対象設備受注業務の取りまとめ責任者として、以下の問いに答えよ。なお、生産性向上圧力が強い社内文化があるものとする。

- (1) 品質管理上不適切な手続きを改めるに当たり、調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (2) 業務を進める手順を列挙して、それぞれの項目ごとに留意すべき点、工夫を要する点を述べよ。
- (3) 効率的、効果的な業務遂行のために調整が必要となる関係者を列記し、それぞれの関係者との連携・調整について述べよ。

【解答のポイント】

製造者等の不適切行為に対する発注者側の視点に立った対応は原子力エネルギー協議会にて「製造業者不適切行為の抑止及び発生時の対処ガイド」として示されている。また、一般的に原子力施設で問題が生じた場合、品質マネジメントシステムの中の不適合管理で対応が取られる。組織の体制・権限等により実施すべきことに多少の差異はあると思われるが、体系的に問題を解決できるようにしていくことが重要である。問題解決の手順に関する規格としてはJIS Q 9024「マネジメントシステムのパフォーマンス改善 6. 継続的改善の手順」やJEAC4111-2021「原子力安全のためのマネジメントシステム」、JEAG4121-2015「原子力安全のためのマネジメントシステム規定 (JEAC4111-2013) の適用指針」がある。

- (1) 品質管理上不適切な手続きを改めるに当たり、調査、検討すべき事項とその内容

「調査項目」

トラブルの内容を明確にし、事実に基づいて定量的に現状を把握できるようデータを集める必要があり、次の事項を考慮し調査する。

- 何が発生しているのか (WHAT)
- いつ発生したのか、日時 (WHEN)
- どこで発生したのか (WHERE)
- 発生した時誰がいたか、誰が処理していたか (WHO)
- なぜ発生したのか (WHY)
- どのようにして発生したか (HOW)

「検討項目」

調査結果を基に直接要因を検討する。本件であれば①なぜ、図面の読取ミスが発生したのか。②どうして現場作業員の判断によりマニュアルにない作業手順で取替を行い規定値に収めたのかにスポットを当てて分析、検討が必要である。

次に、背後要因の検討として、「直接要因の発生を防止できなかった個別業務プロセスに関わるマネジメントシステムの問題点」や「経営層の関与を含めた経営全体に関わるマネジメントシステムの問題点」を明らかにする。更に本件では生産性向上圧力が強い社内文化があるとされており、「安全文化、組織風土の問題点」についても検討する。

- (2) 業務を進める手順を列挙して、それぞれの項目ごとに留意すべき点、工夫を要する点

ここでは、直接要因分析、根本原因分析に分け、項目、留意すべき点、工夫を要する点を示す。

① 直接要因分析

項目	留意すべき点、工夫を要する点
事象の把握	(1) の「調査項目」で挙げた事項を踏まえ、時系列を作成する。特に、事実と推定、未確認情報を区別し、推定、未確認情報はできるだけ調査する。 今回の事例では、いつ、読み取りミスに気が付いたのか。現場作業員はどの時点で、マニュアルにない方法を採用すると決定したのか、どの時点より本来のプロセスから外れていったのか、なぜ他の関係者はマニュアルにない方法を採用したことに気が付かなかったのか、あるいは気が付いていたのにマニュアルにない方法を採用することを容認したのか、関係者を漏れなく挙げて作成する。
直接要因の特定	作成した時系列から問題点を抽出し、原因を特定する。抽出の視点は以下の通り。 技術面：機器の構造、設備管理、学習・伝承、レビュー プロセス：作業特性、標準・基準、要領書・手順書、工程と作業環境、力量、教育訓練、セルフチェック、ホールドポイント、コミュニケーション

項目	留意すべき点、工夫を要する点
	【今回の事例に当てはめてみた場合】 読み取りミスが発生した直接要因として、文字が小さいといった読み取りミスが発生しやすい図面だったのかどうか、照明が暗いといった作業環境の問題はなかったのか、読み取りは一人作業で別の人間が確認する仕組みはなかったのか、作業員が図面を読む力量があったのか、力量を付与する教育に問題はなかったのかといった点が挙げられる。 マニュアルにない方法を採用した直接要因として、現場作業員は読み取りミスが発生した際、本来取るべきプロセスを認識していたかどうか、第三者等によるチェックの仕組みはあったのかどうか、あったのであればなぜ機能しなかったのかといった点が挙げられる。
是正処置及び予防措置の決定・実施	対策は効果が高い順（①～④の順）で検討する ① 作業の数を減らすこと（Minimum encounter） ② 各作業でのエラー発生率を低減すること（Minimum probability） ③ エラーを発見して修正作業を行うこと（Minimum detection） ④ 被害を最小とするために備えること（Minimum damage） 【今回の事例に当てはめてみた場合】 図面読み取りミス防止として、ダブルチェック、図面を読み取りやすくするような改善や照明といった作業環境の改善、作業員への教育、等が挙げられる。 図面読み取りミスが発生した段階で品質マニュアルに基づき、必ず不適合管理を行うよう、不適合管理の仕組みの再教育することや故意に不適合管理を行わずにマニュアルにない方法を採用しないよう、第三者による業務をチェックする仕組みを整備する等が挙げられる。

② 根本原因分析

項目	留意すべき点、工夫を要する点
分析チームの決定と計画の策定	中立的立場で行えるよう、分析対象事象に直接関係しない部門の者で構成する。
事象の把握と問題点の整理	事実の収集は直接原因分析結果をはじめ、幅広く収集する。また、必要に応じてインタビューを行う。 問題点の整理時、過去に遡っていつからそれが行われていたか、通常はどのようなやり方をしているのか、などの疑問が拡大していく。その点に対しても事実関係をしっかり調査し、問題点を鮮明にすることが必要。
分析の実施及び組織要因の検討	明確にされた問題点を起点とし、背後要因を論理的に分析し、組織要因を明確にする。 背後要因の分析では、以下の組織要因を明らかにする。 「直接要因の発生を防止できなかった個別業務プロセスに関わるマネジメントシステムの問題点」 「経営層の関与を含めた経営全体に関わるマネジメントシステムの問題点」 「安全文化、組織風土の問題点」 また必要に応じて、自社及び他社の類似事象を調査し、活用することも有効である。 今回の事例に当てはめてみた場合、本来であれば、読み取りミスに気が付いた時点で不適合管理とし、不適合管理の中で、マニュアルにない方法を採用してもよいが評価して、問題がなければ採用するのがあるべき姿。なぜそうしなかったのかの背景として不適合管理の仕組み（不適合管理を除外できるような規定になってしまっていた、他）や経営の関与に問題がなかったのかを検討する。 更に、安全文化、組織風土の問題点として生産性向上圧力が強い社内文化のため、納期が優先され、安全、顧客への信頼が軽視される風土があったのではないかと推察されるため検討が必要。
対策の検討・提言	直接要因に対する対策と同様の優先順位で検討する。「事象発生メカニズム」における背後要因や背後要因間の連鎖を潰すための対策を多面的に検討する。 今回の事例では、監査時期や監査項目の追加、監査部門の人員強化（外部からの招へい等）、コンプライアンス教育、経営と現場との意見交換による安全文化の醸成活動の強化等が挙げられる。
是正処置及び予防措置の決定・実施	決定にあたっては、以下の点について留意する。 ① 不採用とした対策が問題となる可能性の評価 ② 対策が及ぼす可能性がある副作用についての検討

項目	留意すべき点、工夫を要する点
	③ 対策の水平展開の必要性 ④ 対策の有効性評価のための指標
有効性のフォローアップ	評価方法、時期を定め、対策の有効性を評価し、必要に応じて改善する。評価の際は再発の有無を視点に含める。

- (3) 効率的、効果的な業務遂行のために調整が必要となる関係者との連携・調整
関係者との連携・調整事項を以下に示す。

関係者	連携・調整事項
客先	これ以上客先の信頼を失わないよう、また、社内で隠ぺい工作をさせないためにも直ちに客先へ不適合の報告（不適合による影響。許認可との関係を含む）を行って、今後の計画（不適合の除去（特別採用を含む）、原因分析、是正処置の計画）について順次確認を受けつつ、実績報告を適宜に行い、信頼確保に努める。 客先側では、報告に基づき、原子力発電所の安全への影響評価が行われており、その評価において、取等が発生する可能性もある。その情報も入手して迅速な対応が必要である。
経営者（トップマネジメント）	根本原因分析に係るものが不利益にならないよう保護し、客観的に分析評価可能な環境を整備するよう依頼。 また、安全文化、組織風土の問題点に対する対策は経営者（トップマネジメント）の関与が重要となる。
事象発生部門の関係者	不適合による影響評価、不適合の除去、直接原因分析、是正処置、予防措置を行う部門であり、客先へ影響を及ぼさないよう進捗管理する。 根本原因分析のため、関係者にインタビューに協力してもらう必要がある。犯人探しではなく、再発防止に協力してもらう姿勢を理解してもらうことが重要。

【参考文献】

- [1] 日本工業規格「マネジメントシステムのパフォーマンス改善－継続的改善の手順及び技法の指針」（JIS Q 9024）
- [2] JEAC4111-2021「原子力安全のためのマネジメントシステム」（一般）日本電気協会 原子力規格委員会
- [3] JEAG4121-2015「原子力安全のためのマネジメントシステム規定（JEAC4111-2013）の適用指針」（一般）日本電気協会 原子力規格委員会
- [4] JAXA 技術要求・ガイドライン文書「JERG-0-018 ヒューマンファクタ分析ハンドブック」 JAXA 安全・信頼性推進部
<https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-0-018A.pdf>
- [5] 製造業者不適切行為の抑止及び発生時の対処ガイド
<https://www.atena-j.jp/report/2020/10/atena-20me01rev0.html>

【類似問題】

- ・H29 年度（2017 年度）核燃料サイクル II-2-1

II-2-2 高サイクル熱疲労は、国内外のプラントで配管等の損傷に至る例が報告されている。SMR を含む新しい原子炉プラントの構造設計担当として、構造健全性を設計において確保し高サイクル熱疲労による損傷防止を図るに当たり、新型軽水炉など対象とするプラントの種別を明示したうえで、以下の内容について記述せよ。

- (1) 高サイクル熱疲労が配管・機器の損傷を引き起こすメカニズムとともに、プラント設計において調査、検討すべき事項とその内容を説明せよ。
- (2) 高サイクル熱疲労による損傷防止を図るための業務を進める手順を列挙して、それぞれの項目ごとに留意すべき点、工夫を要する点を述べよ。
- (3) 前述の防止方策をプラント設計に適用するうえで、業務を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方策について述べよ。

【解答のポイント】

本設問では、原子炉プラントにおいて、高サイクル疲労が発生するポイントを適切に理解しておかなければならない。特に、今回は単純な疲労ではなく、高サイクル疲労であるため、長期間で生じる破壊現象を想定する必要がある。その上で、軽水炉においては、流体温度ゆらぎによる高サイクル疲労がよく知られている。これ以外に高サイクル疲労が発生する可能性がある部位を挙げることは難しい。このことから、この問題を選択する受験者は、金属材料及び材料力学に詳しくないと、途中であきらめる可能性がある。上記のことを頭に入れた上で、下記に解答例を示す。

- (1) 高サイクル熱疲労が配管・機器の損傷を引き起こすメカニズムとプラント設計において調査、検討すべき事項とその内容

高サイクル疲労による配管・機器の損傷は、1999年に敦賀2号、2003年に泊2号にて発生している。主な発生原因は、温度差のある流体がもたらす不規則な温度変動によるものである。その過程は、図1に示すように、まず高温と低温の流体の合流部では、温度の異なる流体塊がスケールの渦を作って混じりあう。この時、主流中の空間のある一点に着目した場合、高い周波数の温度ゆらぎが発生する。例えば、管壁の構造物等がある場合、境界層の流体温度ゆらぎを経て、構造の表面温度が不規則に変動する。さらに熱伝導により、板厚内部に温度は伝わり、構造内は温度ゆらぎとなる。その際、減衰と時間遅れが生じ、表面に比べて、板厚内部の温度追従は悪くなる。その結果、構造内部と表面に温度差が生じ、熱膨張差により、構造は変形しようとする。これに対して、構造物自体は自身の形状を保つために、部材の変形を拘束する。これにより、熱応力が発生する。この現象が、多数回繰り返されると、高サイクル疲労で微細なき裂が生じる。プラント部において、調査、検討すべき事項としては、①溶接部、②表面粗さ、③経年化による強度低減、④内圧や溶接残留応力による平均応力がある。

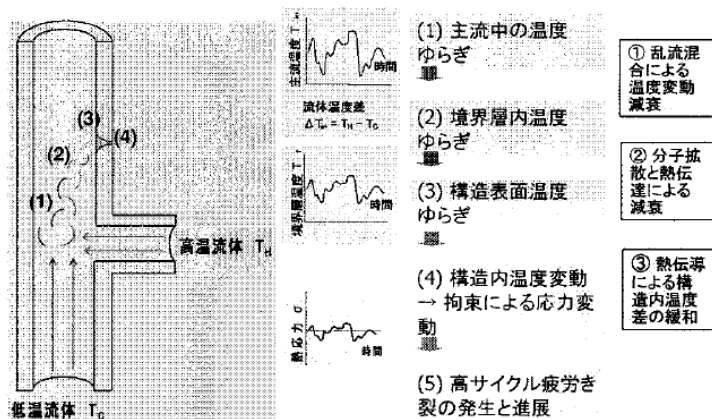


図1 流体温度ゆらぎによる高サイクル熱疲労発生機構

- (2) 高サイクル熱疲労による損傷防止を図るための業務を進める手順を列挙して、それぞれの項目ごとに留意すべき点、工夫を要する点

この疲労現象は高サイクルで生じるため、一つの指標として、 10^6 サイクルでの疲労強度、溶接ビード部の強度低下、乱流による温度減衰変化を観察する。その上で、特に問題がなければ、板厚、熱伝達係数、強度低減係数をパラメータとした ΔT -運転時間の曲線により、経過観察を行っていく。特に、き裂が発生したか否かの把握は、温度及び応力振幅と累積疲労損傷係数によって行う。従来の疲労現象であれば、高サイクル疲労において疲労限が存在するが、実際の現象ではそれを把握することは困難である。そこで、図2に示すように、 10^6 サイクルの低サイクル疲労曲線で得られたプロット点をベースに、それを外挿する形で、高サイクル疲労限を予測する。この際、これまでの高サイクル疲労で破壊が生じた過去のデータと比較を行いながら、き裂が生じると予想されるクラック発生条件を推定していく。また、板厚においては、熱応力が多大な影響を及ぼすため、表層部に限られるピーク応力の把握だけでは、クラック発生条件を把握できない。そこで、3次元的な温度分布を把握すべく、あらかじめプラント機器の3次元モデルを作成し、FEM解析により、流体と構造の連成解析を行うことで、機器内部の温度分布変化を把握する工夫が求められる。

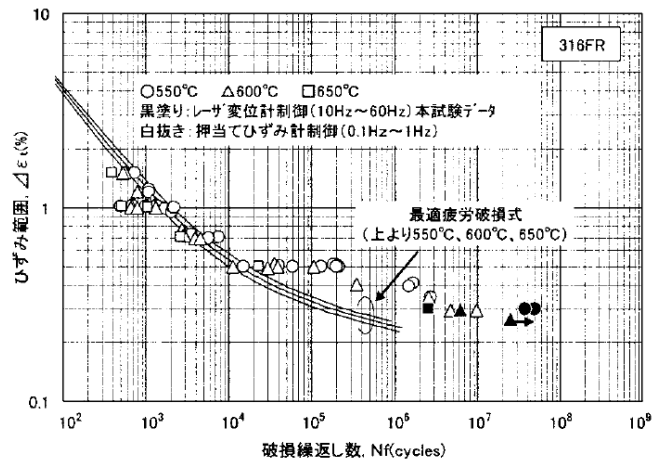


図2 ステンレス鋼の高温疲労曲線とひずみ制御疲労試験データの比較

(3) 前述の防止方をプラント設計に適用するうえで、業務を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方策について述べよ。

この現象は経過観察を常に行う必要がある。そこで、亀裂が発生するであろうエルボ部、管壁部などについて、定期点検の際、こまめに確認をしていくことで、き裂進展を防止することができる。その上で関係者と、具体的に 10^6 サイクル以降に近づいたと推定された時点で、定期的なプラント配管・機器部の観察を行うように調整する。あるいは、き裂の発生しそうな部位があらかじめ把握できているようであれば、その部位に対して、ショットピーニング等の圧縮残留応力を配管外面に付与しておくことも有効である。さらに、き裂の有無発見が難しいようであれば、配管に対して、定期的に浸透探傷試験や超音波探傷試験によって、定期検査の際に、き裂の確認を習慣化する方法もある。これらの方策は、プラント設計時にあらかじめ定期的に行うことをスケジュールに組み込み、プラントが完成した後も、実施していくように、目標管理を徹底していくことで達成される。

【参考文献】

- [1] 流体ゆらぎによる高サイクル熱疲労、材料、Vol. 56、No. 4、pp. 383-388 (2007)。
- [2] Y. Okuda、 “Analysis of Thermal Fatigue Events in Light Water Reactors”、 Nuclear Viewpoints、 Vol. 47、 No. 5、 pp. 60-64 (2001)。
- [3] JSME Standard、 “Guideline for Evaluation of High-Cycle Thermal Fatigue of a Pipe”、 S017-2003 (2003)。
- [4] T. Muramatsu、 “Evaluation of Thermal Stripping Phenomena at a Tee Junction of LMFR Piping System with Numerical Methods (1) Thermohydraulic Calculations”、 SMiRT15、 F05/6 (1999)。
- [5] S. Odaka、 S. Kato and E. Yoshida、 “Very-High Cycle Fatigue Test Technology under Strain Control in High Temperature”、 proc. Of the 42nd Symposium on Strength of Materials at High Temperatures、 No. 13、 pp. 58-62 (2004)。

【類似問題】

- ・ R3 年度 (2021 年度) 原子炉Ⅱ-1-4
- ・ R4 年度 (2022 年度) 原子炉Ⅱ-1-4

5.2 「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」の問題と解答のポイント

Ⅱ 次の2問題(Ⅱ-1、Ⅱ-2)について解答せよ。(問題ごとに答案用紙を替えること。)

Ⅱ-1 次の4設問(Ⅱ-1-1～Ⅱ-1-4)のうち1設問を選び解答せよ。(緑色の答案用紙に解答設問番号を明記し、答案用紙1枚にまとめよ。)

Ⅱ-1-1 我が国の核燃料サイクルについて、ウラン資源利用の観点からその概要を述べよ。

【解答のポイント】

本設問は、ウラン資源利用の観点から核燃料サイクルの利点をどのように解答するかがポイントとなる。原子力発電所から発生する使用済燃料中には未燃焼のウラン 235、中性子を吸収すればプルトニウムとなり有用な原子燃料となりうるウラン 238 が多く含まれており、これら全てを含めてウラン資源の利用という観点から述べたいところである。本問は概要を述べよという問題であることから、現在の我が国の核燃料サイクルの状況、即ち、六ヶ所再処理施設、MOX 施設の竣工、操業に向けた動きを中心に述べ、高速炉サイクルによるプルトニウム利用については振られておく程度で良いと思われる。ここでは、参考になる情報を広く提供することを意図して、軽水炉サイクル（プルサーマル）及び高速炉サイクルによるプルトニウムの利用、ワンス・スルー方式との比較を含め解説することとした。

なお、実際には再処理のマイナーアクチニド（MA）の分離回収技術も検討されているが、ウラン資源利用というよりは、環境負荷低減の観点の解答となりやすいため、書きすぎには注意したい。

以下に、ウラン資源の現状及び核燃料サイクルによるウラン資源の有効利用による効果について解説する。解答にあたっては、紙面の制限を考慮に入れ、キーワードを漏らさず適切な解答としてほしい。

(1) 我が国の核燃料サイクルの動向

第6次エネルギー基本計画では、「我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としている。」と述べている。さらに、「核燃料サイクル政策については、再処理やプルサーマル等を推進するとともに、中長期的な対応の柔軟性を持たせる。」とある。すなわち当面の期間、核燃料サイクルはプルサーマルを主軸に置き、中長期的には、今後の開発状況を鑑みながら対応する旨の方針が示されている。

中長期的な観点からは、2016年12月に原子力関係閣僚会議にて、将来に向けた「高速炉開発の方針」を示し、その中で今後10年程度の開発計画を特定する「戦略ロードマップ」を作成し、プルトニウム利用による高速炉開発計画が示されている。

一方、日本原子力学会新型炉部会 高速炉戦略ロードマップ検討会では、高速炉開発の方向性とその進め方の議論を行い、「高速炉開発に関する技術戦略」として提言している。そこでは、ウラン資源利用率を飛躍的に拡大させるために、軽水炉サイクルから高速炉サイクルの移行を段階的に進めることにより、原子力エネルギーの持続的利用につながるとして、特に高速炉サイクル開発の意義を強調している。

(2) 核燃料サイクルによるウランの利用効率向上

核燃料サイクルは、使用済燃料中から再利用可能なウラン及びプルトニウムを回収し、再び燃料に加工して利用する。これにより、ウラン資源の有効利用が図れ、長期にわたりエネルギー安定供給が確保できる。

① 軽水炉サイクル（プルサーマル）

図1にプルサーマルによるウラン節約の効果の例を示す。軽水炉サイクルは、1トンの使用済燃料（PWR 燃焼度 44,000MWd/tの場合）を再処理し、10kgのプルトニウムを回収でき、130kgのMOX 燃料をプルサーマル燃料として再利用できる。しかし、使用済燃料中の高次化プルトニウムの影響により軽水炉による複数回の再利用は困難であることから、ウランの利用効率は約 1.5倍程度に留まる。

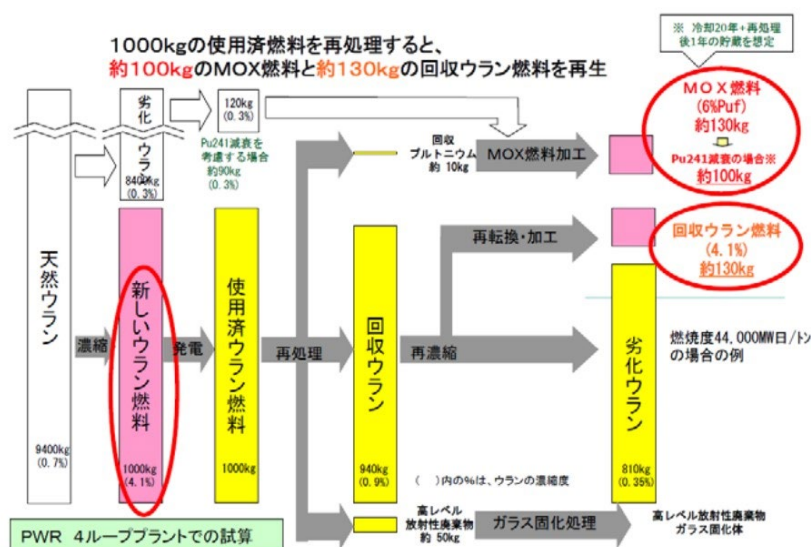


図1 プルサーマルによるウラン節約の効果

出典：日本原子力学会 核燃料サイクルテキスト 1-3 ウラン有効利用と核燃料サイクル

(http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt_1-3.pdf)

② 高速炉サイクル

高速炉サイクルは、回収されたウラン及びプルトニウム全量を新燃料として複数回再利用することができる。これにより、ウラン資源の利用効率は理論上、約 100倍以上に向上し、準国産エネルギーとして我が国のエネルギー自給率を大幅に改善することが期待されている。

(3) 長期的な観点からのウラン資源の有効利用

① ウラン資源と原子力エネルギーの需要の見通し

OECD/NEAレッドブックでは、天然ウラン資源量（既知資源）は、表1に示すように764万トンと見積もられている。一方、図2に世界の原子力成長の見通しを示す。国際原子力機関（IAEA）によれば、2050年までの世界の原子力発電規模の現状と将来動向は、「高ケース」と「低ケース」の2つを予測している。

「高ケース」では、世界の原子力発電設備容量が2030年までに554GWe、2050年までには874GWeとなり、現状規模の2倍以上に増加する可能性があるとしている。一方、「低ケース」では、現状の391GWeのまま2050年まで、原子力発電の規模はやや減少していく傾向を予測している。仮に、世界経済が顕著に発展した「高ケース」の経過をたどると、原子力発電設備の単位発電容量当たりの平均ウラン需要量を155t U/y/GWeとした場合、図3に示すように2070年代過ぎにはウラン資源量（既知資源の764万トン）がひっ迫する。ワンス・スルー方式では、化石燃料による火力発電と同様、将来にわたってエネルギー安定供給を図ることができない。

表1 USD260/kgU未満のウラン資源の現状（2015年1月1日現在）

在来型ウラン資源(Conventional resources)			
1506 万トン			
既知資源(Identified resources)		未発見資源 (Undiscovered resources)	
764 万トン		742 万トン※5	
確認資源※1 (Reasonably assured resources)	推定資源※2 (Inferred resources)	予測資源※3 (Prognosticated resources)	期待資源※4 (Speculative resources)
439 万トン	326 万トン	167 万トン	336 万トン

※1 確認資源：鉱床の規模・品位・形状が明らかな資源

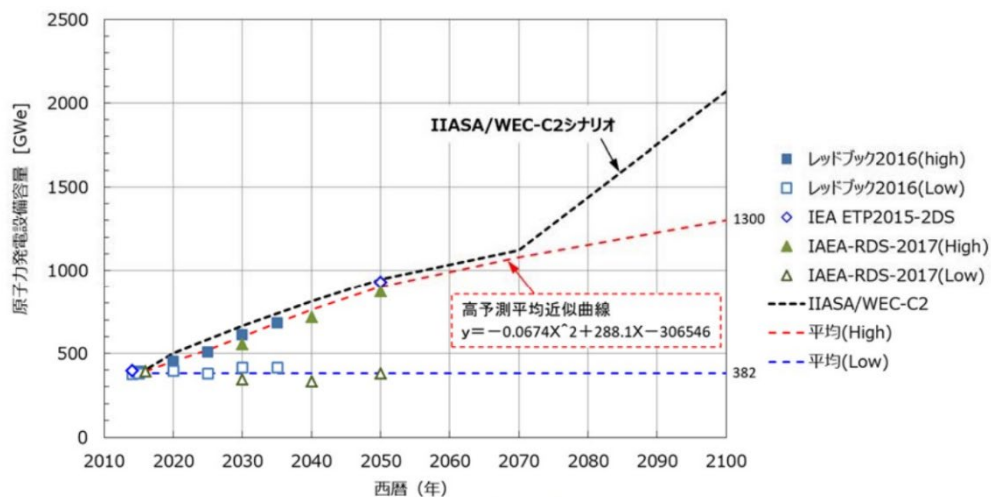
※2 推定資源：鉱床の規模・特性に関するデータが不十分な資源

※3 予測資源：既存鉱床の地質的延長にウラン資源の存在が間接的事実をもとに推定される資源

※4 期待資源：特定の地質鉱床地帯の中に期待される資源

※5 未発見資源 742 万トンには、回収コストレンジが未確定な資源量（239 万トン）を含む

出典：「高速炉開発に関する技術戦略」日本原子力学会新燃料部会 高速炉戦略ロードマップ検討会
(<http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/FRRoadmap-Report-20190731.pdf>)



IIASA/WEC-C2：国際応用システム分析研究所と世界エネルギー会議が作成した報告書（Global Energy Perspectives）の中で、温暖化抑制策として再生可能エネルギーと原子力の普及を想定した環境主導シナリオ
IEA ETP2015-2DS：温室効果ガスとCO₂の排出量を削減した持続可能なエネルギーシステムを提示するシナリオ

図2 世界の原子力成長の見通し

出典：「高速炉開発に関する技術戦略」日本原子力学会新燃料部会 高速炉戦略ロードマップ検討会
(<http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/FRRoadmap-Report-20190731.pdf>)

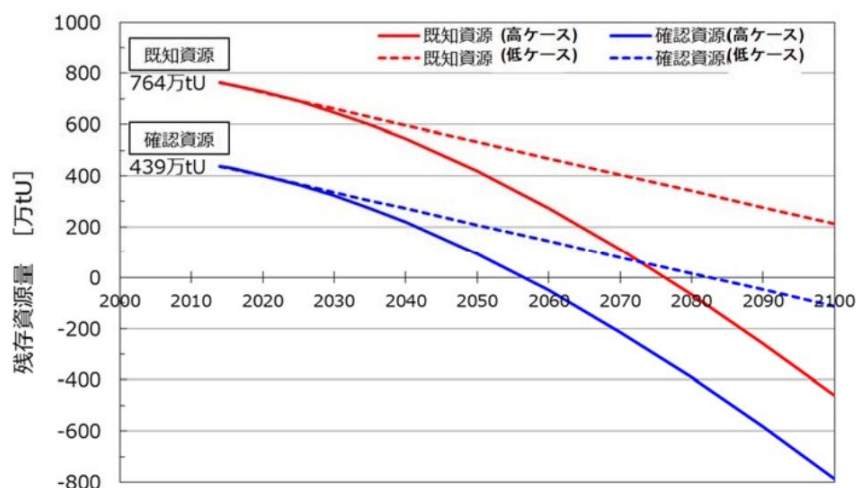


図3 天然ウラン資源の見通し

出典：「高速炉開発に関する技術戦略」日本原子力学会新型炉部会 高速炉戦略ロードマップ検討会
<http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/FRRoadmap-Report-20190731.pdf>

② 高速炉サイクル開発の意義

図4に我が国のエネルギー安全保障に対するシナリオを比較すると、ウラン燃料を利用する軽水炉体系を長期継続する場合、天然ウランの使用量は単調増加する。

直接処分（ワンス・スルー）の場合と比較すると、プルサーマルの長期継続を選択した場合、ウラン資源の節約は2150年時点で約8%となる。高速炉との長期併存～移行を行う場合、2150年時点のウラン資源節約量は約19%となる。2090年頃から高速炉の本格導入～完全移行した場合、30年経過時点（2120年）で約30万トン（約38%）の節約となる。

以上から、2050年代に軽水炉と高速炉の併用によりウランとプルトニウムをリサイクルするMOX燃料サイクルを実用化できれば、資源の有効利用の観点から最低限の要求に応えられる。

その後、高速炉の割合を増やし、軽水炉で燃えにくいウランやプルトニウムの同位体を、高速炉で燃えやすい同位体に核変換・燃焼することで、ウラン資源の利用効率を数十倍高め、現状の確認埋蔵量でも数千年の利用が可能となる。

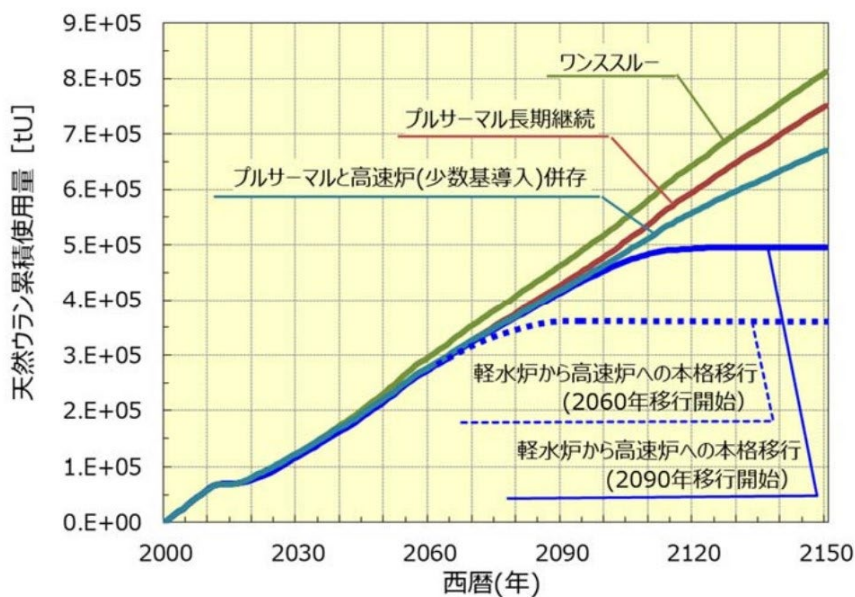


図4 エネルギー安全保障に対するシナリオの比較

出典：「高速炉開発に関する技術戦略」日本原子力学会新型炉部会 高速炉戦略ロードマップ検討会
<http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/FRRoadmap-Report-20190731.pdf>

【参考文献】

- [1] 鍛冶直也：核燃料サイクルテキスト 1-3 ウラン有効利用と核燃料サイクル、日本原子力学会、2012 年
- [2] 田中治郎：原子力と核燃料サイクルの将来に向けて、日本原子力学会誌、60 巻 3 号、pp. 152-156、2018 年
- [3] 戦略ロードマップ 原子力関係閣僚会議、2018 年
- [4] 高速炉開発に関する技術戦略 日本原子力学会 新型炉部会高速炉戦略ロードマップ検討会、2019 年

【類似問題】

- ・ R3 年度 核燃料サイクル III-1

II-1-2 PUREX 法について、その技術的概要を述べよ。

【解答のポイント】

日本では、原子力発電所の使用済燃料に含まれるウラン (U) とプルトニウム (Pu) を再利用するために PUREX (Plutonium Uranium Redox EXtraction) 法により、これらを回収した後、再び燃料に加工し、新たな燃料として利用することとしている (核燃料サイクル)。

PUREX 法は溶媒抽出法の一つであり、抽出溶媒に耐酸性に優れたリン酸トリブチル ($(C_4H_9O)_3P=O$) (以下「TBP」という。)を採用した湿式再処理の方法である。

互いに混じり合わない 2 相間における着目成分の親和性 (分配率) の違いを利用して物質の分離を行うものであり、分離したい物質を溶解している水溶液に有機溶媒を接触させることで、その物質を有機溶媒に選択的に移行させる。分配係数 (溶媒相中の成分の濃度/水溶液中の成分の濃度) の値は、成分元素の種類及び原子価、水溶液の酸濃度、温度などにより変化するため、これらの因子を目的に合わせて調整し、抽出単位操作を所要の純度と回収率が得られるまで繰り返す。

再処理の技術開発として、PUREX 法以外では、リン酸ビスマス法、REDOX 法、BUTEX 法と呼ばれる溶媒抽出法などの研究が進められてきたが、その溶媒抽出法の中でも廃棄物発生量、コスト、また、使用済燃料の溶解に硝酸を使用することから、抽出剤の耐硝酸性、耐放射線性等の点で優れた PUREX 法が広く用いられるようになった。現在、商業規模の再処理工場を有する主な国は日本 (六ヶ所再処理工場) 以外にはフランスがあり、これらの再処理工場では、全て PUREX 法が採用されている。

実際の再処理工場の運転では PUREX 法が工程内で適切に行われるように、不溶解残渣の除去等が行われており、分離したウラン及びプルトニウムは硝酸ウラン及び硝酸プルトニウムとして精製・濃縮し、後の工程でウラン粉末、MOX 粉末とする。

問題は PUREX 法の技術的な概要について問われており、溶媒抽出の基本的な記載、ウラン及びプルトニウムの抽出特性 (酸濃度や価数調整による抽出/逆抽出の考え方など) に関する記載が必要となる。以下、解答例を示す。

PUREX 法は、再処理施設で使用済核燃料の溶解液からウラン (U)、プルトニウム (Pu) 及びその他の核分裂生成物 (FP) を分離する溶媒抽出法である。PUREX 法では、水相に硝酸を用い、有機相に耐酸性や U と Pu に対する高い選択性を有したリン酸トリブチル (TBP) をノルマルドデカンや n-パラフィン混合物等で希釈したものを用いる。

使用済燃料中の各元素は自身の原子価や溶液の酸濃度によって、分配係数が異なる。PUREX 法では硝酸で溶解した硝酸溶液 (水相) を抽出器 (ミキサセトラ、パルスカラム等) 内で n-ドデカンに 30% の TBP を混合した溶媒 (有機相) を強制的に接触させ、性状によって、各元素の分配係数が異なる性質を利用して、U 及び Pu を選択的に分離するものである。

- ① 硝酸溶液中の U は U(VI)、Pu は Pu(IV) として存在している。溶液中の酸濃度が高い場合、U(VI) 及び Pu(IV) は TBP と錯体を形成し有機相に移行 (抽出) し、低い場合は水相に留まるため、酸濃度を高め、有機相と接触させることで U 及び Pu を有機相に移行させる。
- ② U 及び Pu を抽出した有機相と酸濃度を下げた水相とを接触させ、U 及び Pu を水相側に移行させる (逆抽出)。
- ③ U から Pu を分離するため、一旦 U、Pu を有機相に抽出した後、U を抽出されやすい U(VI) の状態に保ったまま、Pu のみを水相に移行させるため、還元剤 (ヒドラジン等) を含んだ水相と接触させ、Pu の原子価を 4 価から 3 価に還元する。
- ④ Pu を分離した U は、水相の酸濃度を下げて水相へ移行させる。

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典 ATOMICA 「再処理の概要 (04-07-01-01)」
- [2] 原子力百科事典 ATOMICA 「抽出工程の安全性に関する研究 (06-01-05-06)」
- [3] 小島久雄 (著)、核燃料サイクル工学概論、JAEA-Review 2008-020 (2008)

【類似問題】

- ・ H29 年度 (2017 年度) 核燃料サイクル II-1-4

II-1-3 ウランの特質を踏まえたウラン廃棄物の埋設処分の概要と現状について述べよ。

【解答のポイント】

ウランの特質や、ウラン廃棄物の埋設処分に関しては、ATOMICA や添付に示した参考文献を参考に、概要を抽出、要約すれば良い。以下、ポイントとなる事項について、箇条書きで挙げておく。

<ウランの特質>

- ・ウラン同位体の半減期は非常に長いので、廃棄物の放射性核種濃度は実質的に低下しない。
- ・子孫核種の生成により放射能濃度は徐々に増加し、数十万年でピークに達する（ビルドアップ）。
- ・気体状の子孫核種であるラドン 222 が生成し、条件によっては有意な被ばく線量を与える可能性がある。
- ・放射線学的影響以外の因子（たとえばウランの重金属としての性質）による影響が問題となる可能性について考慮する必要がある。
- ・臨界管理に関する配慮が必要である。

<ウラン廃棄物の埋設処分の概要と現状>

- ・ウラン廃棄物の発生場所：ウラン製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工の各工場・研究開発施設等
- ・廃棄物の種類：主にウランで汚染された廃棄物（気体、液体、固体）。ただし処分上、問題になるのは固体（液体廃棄物を固化したものを含む）
- ・処分方法：浅地中に埋設するトレンチ処分（L3）及びピット処分（L2）並びに70m以深に埋設する中深度処分（L1）のいずれかの方法から、放射能濃度に応じて決定する。一部、地層処分（300m以深）も想定される（L1までで処分できない、放射能濃度の高いもの）
- ・L3、L2についての法令上の要求事項：埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質（ウラン 234、ウラン 235 及びウラン 238 に限る。）について、その総放射能量をメガベクレル単位で表した数値を当該放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設し、又は設置する物の重量をトン単位で表した数値で除して得た値が1を超えず（平均 1Bq/g 以下）、かつ、当該廃棄物埋設地内における当該放射性物質の分布がおおむね均一であること（廃棄物埋設地内を体積が同程度である複数の区域に区分した場合にそのいずれにおいても、ウラン（ウラン 234、ウラン 235 及びウラン 238 に限る。）の放射能濃度が10メガベクレル毎トンを超えないこと（いずれの区域も 10Bq/g 以下））。
- （「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第十三条第1項第3号および「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（改正 令和3年9月29日 原規規発第2109292号 原子力規制委員会決定）第13条7を元に一部補足）。
- ・線量評価：第二種廃棄物埋設施設の廃止措置に係り以下の評価がされていることが要求されている（線量ピーク値が出現する時が廃止措置の開始後1000年が経過した以降である場合）。

	最も厳しいシナリオ	最も可能性が高いシナリオ
廃止措置の開始後 1000 年が経過するまでの期間内	300 μ Sv/y を超えないこと	10 μ Sv/y を超えないこと
廃止措置の開始後 1000 年後以降（人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータを再設定）	線量ピーク値がおおよそ 1mSv/y 以内	線量ピーク値がおおよそ 100 μ Sv/y 以内

（「第二種廃棄物埋設の廃棄物埋設地に関する審査ガイド」（原子力規制委員会、最終改正：令和4年4月20日）3.1.2(4)④項を元に表作成）

- ・埋設処分の現状：日本においてウラン廃棄物の埋設処分の実績はない。当面は、審査ガイドまで整備された L3、L2 での埋設処分を検討することとなる（発生元施設：核燃料物質加工施設など）。
- なお、クリアランスレベルを下回る金属については、クリアランス制度に基づく再利用等により、放射性廃棄物としての埋設処分が必要なウラン廃棄物の発生量低減も進められている。

【参考文献】

- [1] 「原子力教科書 放射性廃棄物の工学」（長崎晋也、中山真一）第1版第1刷 P17-18
- [2] 原子力百科事典 ATOMICA_05-01-01-04 「わが国の放射性廃棄物の種類と区分」
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_05-01-01-04.html
- [3] 「ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設に係る規制の考え方」 令和3年3月10日、原子力規制委員会

【類似問題】

- ・ R2 年度（2020 年度）核燃料サイクル II-1-4

【解答のポイント】

クリアランス制度の概要については、様々な機関のホームページに掲載されるなど、概要の紹介はそれらのエッセンスをまとめる形で記載すれば良い。検討が必要なことは、「制度を効果的に運用するための留意点について述べよ」とあることである。本解説の冒頭に記載した事項を考えると、示すべき資質・能力（コンピテンシー）は、選択科目についての専門的学識、コミュニケーションの各項目である。クリアランス制度自身は、廃止措置等に伴って発生する放射性廃棄物として管理するまでもない廃棄物を合理的に管理する趣旨で設けられた制度であり、原子力発電所の方では廃止措置との関係で先行して進んでいるが、核燃料サイクル施設、特に再処理施設では評価対象核種の特定など難しい側面があり、そのことを踏まえつつ、答案構成を考えたいところである。

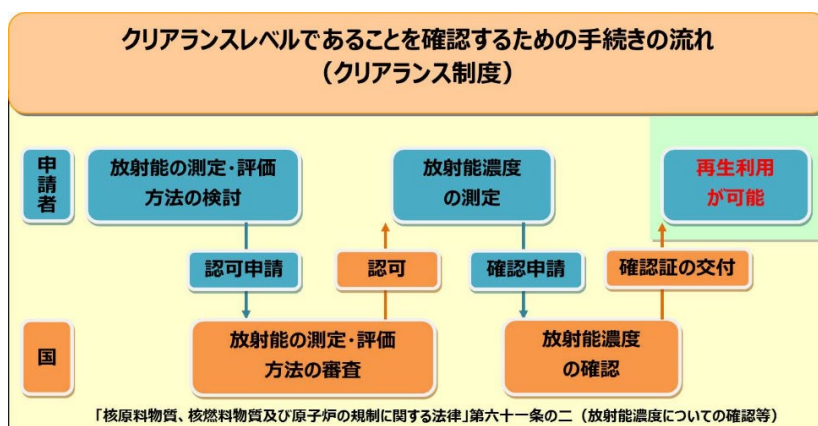
以下、最低限触れておきたい事項を中心に解答のポイントを記載する。

＜クリアランス制度の概要＞

クリアランス制度は、原子力施設の運転や廃止措置に伴って発生する廃棄物のうち、放射性物質の放射能濃度が低く、人への健康影響がほとんどないと考えられているものについて、国の許可・確認を得て一般の廃棄物として再利用又は処分できる制度をいう。

放射能濃度が低く、人への健康影響がほとんどないレベルとして1年間に受ける放射線量が0.01mSv(10μSv)となる放射能濃度と定められておりこれを「クリアランスレベル」と呼んでいる。この線量は、自然界の放射線から受ける線量の1/100以下であり、仮に複数の影響が重なった場合でも人への健康影響を無視することができると国際的に認められている。

一般の廃棄物と同様に再利用や処分するためには、それが、「クリアランスレベル」以下であることを証明する必要がある。法令に基づく国の確認を受ける必要がある。まず、原子力事業者は、対象となる放射性廃棄物に含まれる放射能の測定方法、評価方法を検討しクリアランス認可申請書を原子力規制委員会へ認可申請を行う。原子力規制委員会では、これらの方法を確認し、妥当であれば認可する。次に事業者は、認可された方法に基づき放射性廃棄物の放射能濃度を測定・評価し、この測定・評価結果について原子力規制委員会へ確認申請を行う。原子力規制委員会では、この測定・評価結果を確認し、クリアランスレベルを下回っていること等を確認できれば、事業者に確認証を交付する。この2度にわたる原子力規制委員会の確認を受けた放射性廃棄物は、「クリアランスレベル」以下であると認められ一般廃棄物と同じように取り扱うことができるようになる。



出典：電気事業連合会ホームページ

(<https://www.fepc.or.jp/nuclear/haishisochi/clearance/safety/index.html>)

なお、クリアランス制度は、2005年の「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の改正において、日本国内にも導入された。国内では、日本原子力発電（株）東海発電所および中部電力（株）浜岡原子力発電所から発生した廃棄物の一部がクリアランスレベル以下であると認められ、再利用が始まっているだけでなく、研究機関等その他の施設についても実施され始めている。

クリアランス制度を運用する利点は、以下があげられる。

1) 「循環型社会」形成への貢献

環境負荷の低減が必要な現代社会において、原子力施設の運転・解体に伴って発生する廃棄物も、ほとんど汚染の無いものは資源として有効に再利用することで、日本が目指す「循環型社会」形成に貢献できる。

2) 円滑な廃止措置の進展

原子力施設の廃止措置からは大量の廃棄物が発生する。放射性廃棄物の保管場所は限られているため、クリアランス制度により放射性廃棄物として扱う必要のないものは、再利用するなど適切かつ合理的に処理処分することで、廃止措置を円滑に進展できる。

3) 放射性廃棄物の削減

本来、放射性廃棄物として扱う必要がない廃棄物をクリアランス制度により有効活用又は一般の廃棄物と同様に処理することで放射性廃棄物として処分する物量を減らすことができる。

<効果的に運用するための留意点>

クリアランス制度は、2005 年に制度化されたものの、いまだに事業者内で自主的な再利用に限定されており、市場流通までには至っていない。運用を効果的に行うための代表的な留意点を以下にまとめた。

●国の認可が必要

クリアランス以下であることの確認を受けるためには、原子力規制委員会に「測定・評価方法」及び「測定・評価結果」それぞれ認可を受ける必要がある。特に測定・評価方法は、再利用などの際の被ばく経路対象核種などを明確にし、対象廃棄物の放射線量が $10\mu\text{Sv/y}$ 以下であることを証明する必要がある。このため、サンプルの代表性、測定精度、検出下限値等を詳細に検討して、申請することが必要となる。

●確認が完了するまでは、放射性廃棄物として管理が必要

「測定・評価結果」の確認が完了するまでは、放射性廃棄物として管理区域内に貯蔵する必要がある。よって、他の放射性廃棄物から汚染が広がることや、他の廃棄物が混入することを避けるため隔離して厳重に貯蔵する必要がある。

●制度の理解促進が必要

2005 年に制度化されたが、日本では社会に定着するまでは、「①電気事業施設や発電所内の施設での再利用」「②原子力関連施設での再利用」「③クリアランス制度の理解促進のための展示」に用途が限定され、市場に流通することがないように運用されている。今後、廃止措置を行う原子力施設が増加することからも、放射性廃棄物の処理処分を円滑にかつ安全に進めるためにクリアランス制度の理解促進活動が重要である。

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典 ATOMICA 「各国における放射性廃棄物規制除外（クリアランス）の動向（11-03-04-05）」
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_11-03-04-05.html
- [2] 原子力百科事典 ATOMICA 「日本のクリアランス制度(11-03-04-10)」
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_11-03-04-10.html
- [3] 「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について」（平成 16 年 12 月 13 日改訂、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会）
- [4] 原子力規制委員会、クリアランス制度の概要
<https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/haiki4.html>
- [5] 原子力発電所の解体（一般廃炉）の現状と課題について、資源エネルギー庁、平成 31 年 4 月 23 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/020_04_00.pdf

【類似問題】

- ・ H29 年度（2017 年度） 放射線Ⅲ-1
- ・ H30 年度（2018 年度） サイクルⅡ-1-3
- ・ R2 年度（2020 年度） サイクルⅢ-1

Ⅱ-2 次の2設問(Ⅱ-2-1、Ⅱ-2-2)のうち1設問を選び解答せよ。(青色の答案用紙に解答設問番号を明記し、答案用紙2枚を用いてまとめよ。)

Ⅱ-2-1 ある核燃料施設では、新規規制基準が求める重大事故対策等に対応するため、様々な安全対策工事、補強工事を進め運転再開を目指すこととなった。あなたはこの核燃料施設の工事を担当する技術責任者である。工事を進めるに際して以下の内容について記述せよ。なお、解答に当たっては、新規規制基準に照らし新たに必要となる工事の1つを設定し、最初に明記すること。

- (1) 工事を進めるに当たり調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (2) 工事を進める手順を示し、それぞれの段階において留意すべき点、工夫を要する点を述べよ。
- (3) 工事を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方策について述べよ。

【解答のポイント】

核燃料施設(事業)の種類に応じ、新規規制基準の個別具体的内容が異なるため、それを把握した上で対応を進めることになる。また、本問では、「運転再開」とあるので、既にホットインした施設の前提で論述することになる。

問題文の「なお書き」にあるように、本問では新規規制基準で要求される事項のうちの工事のひとつを設定し解答することが求められているため、新規規制基準で求められている事項のポイント、考え方を念頭においた上で、個別の工事案件に対し論述する。

新規規制基準は、自然災害への対策、重大事故への対処に係る要件が大幅に拡充された基準である。どの項目で論述するにしても、新規規制基準以前の規制と新規規制基準で求められていることの違いを良く理解しておく必要がある。

本設問の場面設定では設計開始段階なのか、既に終えているのか明確ではないが、ここでは、設計を含めて、共通的に考えるべき事項を挙げてみる。

1) 既存施設の実力の再評価、設計上考慮する自然災害の特定(設定)

- ① 耐震性評価のように、従前より計算評価が求められていた項目では、設計の基となる基準地震動を見直す必要があるため、その評価を行い、補強対策が必要な箇所を見極める必要がある。
- ② 津波対策、竜巻対策のように従来、個別に評価が求められていなかった項目については、サイトの立地場所や気象条件、津波の発生源等との関係から、どのような規模の災害が起こり得るかを調査、評価し見極める必要がある。

ここで各自然災害への対策の評価にあたっては、発電用軽水型原子炉施設に適用される各種評価ガイドを参考に評価を行う。

2) 影響の程度に応じた対策の検討・立案、既設への影響評価、他の工事との関係の整理

基本的には、運転再開に向け新規規制基準の要求に適合することが前提となる。事業の種類や規模にもよるが、様々な対策を講じる必要があると考えられるため、1つの対策の工事を担当する技術責任者であったとしても、必要となる対策(他の対策)との干渉、工期の調整(工事順、優先順位)や、新たな対策による既存の機能や操作、保守方法等に与える影響を生じないようにする必要がある。そのために、関連する工事の担当部署、既設設備の管理担当部署などとの調整が必要になる。

3) 設計・検討及び許認可対応(適合性確認に係る審査対応)

適合性確認においては、規制当局に新規規制基準を満足していることを説明することになる。少なくとも、設計段階において、規制要求への対応や他工事との調整など、上記のような考慮事項を踏まえた上で設計をほぼ確定しておく必要があること、規制当局との折衝において更なる要求があった場合に設計変更や工事内容、工事時期など、柔軟に対応できるよう、関係部署、調達先などと十分に協議しておく必要がある。

4) 工事の実施段階の管理

他の工事や現場の保守作業などを踏まえ、作業場所(資機材置き場の確保などを含む)が干渉し作業に支障をきたすようなことは避けなければならない。重機の寄り付きを含めたアクセスルートの確保、通常のプラント管理へ影響を及ぼさないような配慮や、必要に応じて工事期間中の保安管理上の代替策の検討などを含めて、対応、調整を検討することになる。また、事故対処設備などで、設置後速やかに運用開始が望まれる設備もあるため、これらの使用開始までの流れを含めて計画、管理することが望ましい。

使用前事業者検査、使用前確認などの手続きの進め方を含めて、事業者にも求められる品質管理を確実に行う必要がある。

【参考文献】

[1] 原子力規制委員会ホームページ

- 使用済燃料の再処理の事業に係る再処理事業者の重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準 <https://www.nra.go.jp/data/000187197.pdf>
- 再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 <https://www.nra.go.jp/data/000100826.pdf>
- 再処理施設の技術基準に関する規則の解釈 <https://www.nra.go.jp/data/000308622.pdf>
- 原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則の解釈 <https://www.nra.go.jp/data/000304076.pdf>
- 加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 <https://www.nra.go.jp/data/000172362.pdf>
- 加工施設の技術基準に関する規則の解釈 <https://www.nra.go.jp/data/000308611.pdf>

- 核燃料施設等における竜巻・外部火災の影響による損傷の防止に関する影響評価に係る審査ガイド
<https://www.nra.go.jp/data/000351849.pdf>
- 実用発電用原子炉に関する規則・告示・内規・ガイド https://www.nra.go.jp/law_ki_jyun/law_jitsuyou_kisoku.html

[2] 日本原燃株ホームページ

- 再処理工場の主な安全性向上対策のための準備工事状況について <https://www.jnfl.co.jp/ja/special/construction-status/>
- MOX 燃料工場の建設状況について <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/mox/construction/>

[3] 核燃料サイクル施設の規制基準と六ヶ所再処理施設の安全対策、芳中一行ほか、技術士 2021/11、

https://www.engineer.or.jp/c_dpt/nucrad/topics/006/attached/attach_6998_8.pdf

【類似問題】

- ・ H29 年度（2017 年度）核燃料サイクルⅢ-1
- ・ R3 年度（2021 年度）核燃料サイクルⅡ-2-1

Ⅱ-2-2 新たに核燃料施設を建設することとなった。あなたは、当該核燃料施設における核燃料物質の安全な取り扱いを考慮した施設・設備設計を行う技術責任者である。解答に当たっては想定する核燃料施設の種類の明記したうえで、以下の内容について記述せよ。

- (1) 業務を進めるに当たり調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (2) 業務を進める手順を列挙して、それぞれの項目ごとに留意すべき点、工夫を要する点を述べよ。
- (3) 業務を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方策について述べよ。

【解答のポイント】

本設問は、新規に核燃料施設の建設にあたり、施設・設備の設計に関する問題である。題意を素直に読めば、核燃料施設・設備の安全設計に係る技術責任者の立場での解答となるだろう。しかし問題文が「核燃料物質の安全な取り扱いを考慮した」とあいまいな表現となっているので、核燃料物質のマテハン装置の設計メーカーの技術責任者の立場としての業務も想定できる。

核燃料施設の共通した安全設計として、閉じ込め機能の他、耐震設計、臨界安全、遮へいは特に重要であるが、その他の考慮すべき事項として、新規規制基準において規定されている溢水、津波、竜巻等への設計対応や、重大事故対処も必要である。再処理施設、ウラン加工施設、MOX 燃料加工施設、貯蔵施設、廃棄施設等の特徴を踏まえた上で、規制基準との適合性を考慮した設計を進めることとなる。

ここでは、MOX 燃料加工施設の設備設計を想定して解説する。MOX 燃料加工施設の特徴として、 α 核種であるプルトニウムを非密封で取り扱う必要があるため、閉じ込め機能を有するグローブボックスシステムを基本とし、作業員の外部被ばく防止の観点から遠隔自動化を検討する必要がある。本解説では、調査、検討すべき事項や業務遂行手順を幅広く挙げるが、施設の特徴を踏まえて自分の専門性を活かした答案にしていたきたい。

(1) 調査、検討すべき事項とその内容

対象となる設備の規模や取扱量、取扱い方法などは施設設備の設計を行う上で重要なインプット情報となる。これにより、プラントの処理能力の評価の他、安全評価や安全確保上の対策として実施すべき事項（臨界安全上の核的制限値の設定や基準地震動の策定、事故時の環境影響の条件設定など）、遠隔操作の採否などに影響するためである。また、最近のIoT技術等の最新技術の制御システムへの適用性についても検討すべき事項である。具体的に調査、検討を要するべき事項として以下のようなこと（例示）が考えられる。

1) 核燃料物質の取扱量及びその性状等の調査

核燃料物質情報（プルトニウム含有率および同位体組成等）及び取扱量（非密封、密封状態状態）の調査。

2) 既存処理技術及び最新知見・技術の調査

MOX燃料製造方法について、既存技術に加え、最新知見・技術の調査検討。特に、グローブボックスシステム及び遠隔自動・制御システムに係る最新知見・技術の調査。

3) 適用する規制基準類等の調査

適用する加工事業許可基準、加工事業規則及び技術基準等の調査及び必要な安全設計の選定。

4) 設計用基準地震動(Ss)の策定のための調査

耐震重要度分類Sクラスを想定した文献調査及び地盤調査等。

(2) 業務を進める手順及び留意点、工夫点

通常、設備の設計を行う場合には、処理能力、物流など一連のプロセス（工程）を想定（設定）し、その流れに沿って構成される各設備の基本的仕様を定め、その上で必要な安全対策や、構造評価の検討など、基本的事項を定めた上で設計を進めることになる。プロセスの想定や設備の基本仕様の決定にあたっては、その成立性や安全性について必要に応じて評価試験を行うことで確認する場合もある。本問においては、細かく条件設定がされているわけではないが、そのMOX加工に用いる設備の仕様までは決定されている前提で、閉じ込め機能に係るグローブボックスの設計等の手順、留意事項を挙げてみた。

1) グローブボックス等の設備設計

MOX燃料製造施設では、特に閉じ込め機能及び耐震性の確保の観点から、グローブボックスの設計は最重要事項である。加工設備をどのような単位で分割しグローブボックスに収納するかで大きく設備の仕様が変わってくる。MOXは粉末の状態では、飛散しやすく設備機器の隙間や狭い部に溜まりやすい。グローブボックス内にMOX粉末が滞留すれば装置のメンテナンス時の外部被ばくの原因となるため、その集塵方法や滞留防止などに留意したいところである。また、内装設備の更新、グローブボックス本体の更新などが供用期間中に想定される場合には、関連する設備やその際の防護装備を合わせてどのように対応するのかを考慮しておきたい。

2) 設計基準事故及び重大事故の選定及びその対応策の検討

加工事業規則の要求事項を満足するために各種安全設計を行う必要があるが、特に設計基準事故及び重大事故に対する設計対応が求められる。本問は、新規建設を想定した問題であるため、技術基準の要求を合理的に満足できるよう考慮しておきたいところである。加工施設の場合には、加工事業規則では、以下の重大事故が規定されている。合わせて、どの原子力施設もそうだが、予め廃止措置方針を定めておくことが求められており、そのことにも留意しておく必要がある。

① 臨界事故

② 核燃料物質の閉じ込め機能の喪失

日本原燃株のMOX燃料加工施設での重大事故は、②の閉じ込め機能の喪失を想定し、事故発生及び拡大防止措置が採られている。

3) 安全設計に係る各種評価試験

安全設計を進めるうえで、必要となる評価試験（実験）により客観的データを揃えておくことが重要である。規制当局による認可を受けるために、技術的根拠を明確にする必要があるため、許認可に要する期間、円滑な認可取得のためには、安全性が確実に説明できるよう、使用実績の有無、その根拠データの取得状況などを考慮して、遅れを生じないよう配慮しておきたいところである。特に火災・爆発時の施設及び環境への影響について評価することは、事故発生時の防止及び拡大防止対策の検討につながる。

4) 品質マネジメント

設計から建設までの一連のプロセスについて品質管理が求められることに留意しておきたい。品質管理は各原子力事業者に通じて求められており、法制化されている。特に、設計においては、インプット条件として、その設備に要求される法的要求事項の洗い出し、アウトプットではその要求事項を満足することを確実にするための検証方法や製作物の装置に対する妥当性確認方法を明確にしなければならない。設計に係る技術的検討においては専門家の寄与が必須であり、レビューなどを通してその安全性確保が確実になされるようにする必要がある。既に他の施設の運用を行っている事業者であれば、既存の品質マネジメントシステムに従うことで対応は可能と思われるが、新規事業者においては、品質マネジメントシステムの構築から対応することになる。

5) スケジュール管理

全体を通じて、設計から許認可（事業許可申請及び設工認等）、建設工事・使用前事業者検査に至るまでのプロセスを管理する必要がある。各工程に要する期間を適切に見通し、目標とする操業開始時期とのギャップがある場合には、工程の短縮や資源の配分など、予め対応を検討しておく必要がある。これが適切になされないと、事業計画に大きな影響を及ぼすことになる。

(3) 関係者との調整方策

技術責任者の立場として、上記の業務遂行には、多岐にわたる利害関係者との調整が必要である。設計においては、当該設計に係る専門的要素は何かを見極めた上で関係部署、外部委託先等との調整を行う必要がある。許認可に際しては、規制当局との円滑な調整のため、法的要求に対応するよう技術的根拠を積み上げておくこと、その他、予算、要員、新規建設に係る利害関係者となる地方自治体との調整など、関係各所との取り決めなどを考慮しつつ、タイムリーに調整を図る必要がある。主な調整事項、調整先としては以下のようなものが考えられる。

- ① 安全評価・解析・実験等の実施：安全評価部門
- ② 設計・建設スケジュール、設計・建設費用：委託先
- ③ 事業者検査、設計管理など：品質保証（管理）部門、検査部門
- ④ 予算、要員：社内経理部門や人事部門との調整
- ⑤ 認可取得：規制当局
- ⑥ 新規建設に関する同意：地方自治体

【参考文献/参考情報】

- [1] 核燃料物質の加工の事業に関する規則、昭和41年総理府令第37号
- [2] 加工施設の技術基準に関する規則、令和2年原子力規制委員会規則第6号
- [3] 使用済燃料の再処理の事業に関する規則、昭和46年総理府令第10号
- [4] 使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則、平成12年通商産業省令第112号
- [5] 核燃料物質加工事業許可変更申請書（MOX燃料加工施設）、日本原燃（株）、2022年1月
- [6] 再処理事業所再処理事業許可変更申請書 本文及び添付書類の一部補正について、日本原燃（株）、2020年4月

【類似問題】

- ・R元年度 核燃料サイクルⅡ-2-2

5.3 「放射線防護及び利用」の問題と解答のポイント

Ⅱ 次の2問題(Ⅱ-1、Ⅱ-2)について解答せよ。(問題ごとに答案用紙を替えること。)

Ⅱ-1 次の4設問(Ⅱ-1-1～Ⅱ-1-4)のうち1設問を選び解答せよ。(緑色の答案用紙に解答設問番号を明記し、答案用紙1枚にまとめよ。)

Ⅱ-1-1 放射性物質や核燃料物質の空气中濃度と表面汚染密度との関係を具体的な例をもって説明するとともに表面汚染された場所で作業をする場合の留意点を述べよ。

【解答のポイント】

解説者の経験に基づき、ポイントと解答例を2例紹介したい。

(例1) 施設放射線管理の観点

(解答作成の方針) 施設放射線管理の実務経験を基にした解答として、空气中濃度と表面汚染密度の関係性の具体例として再浮遊係数による評価とその制限について述べる。表面汚染された場所で作業をする場合の留意点としては物体からの汚染の再浮遊低減や局所集塵等に加え実際の防護装備選定の留意点などを説明する。以下に解答例を示す。

放射性物質や核燃料物質を非密封で取扱う場合、空間線量率管理に加え、ダストサンプラ(モニタ)を用いた空气中濃度管理と、直接・間接サーベイによる表面汚染密度管理を実施することが望ましい。施設や電源確保等の制約によりサンプリングが実施困難な場合には、表面汚染密度(Bq/cm^2)を管理・評価したうえで再浮遊係数(cm^{-1})を乗じることで、空气中濃度の管理を行う手法がある。再浮遊係数は作業形態に応じて $10^{-5}\sim 10^{-7}(\text{cm}^{-1})$ オーダーとなり、過去の作業実績や事前試験等から求める必要がある。推定による空气中放射性物質濃度管理はあくまでも空気汚染の発生リスクが低い場合にとどめるのがよい。

表面汚染された場所で作業をする場合、汚染の再浮遊が物体表面の濡れの影響を受けるため、表面を濡れたウエスでふき取るなど、湿式の対応が有効である。それが困難な場合は局所でのダスト集塵やろ過も有効である。空気汚染に対する身体汚染の防護としては全身をタイベックスーツ等で覆うことに加え、現場の空气中放射性物質濃度や作業時間を考慮したうえで全面マスク等の呼吸保護具を選定し、着用する。過重な装備は身体負担も大きいので、まず汚染の再浮遊リスクを低減する等、環境改善に努めたうえで、それでも作業時間が長くなる場合は負荷軽減策として電動ファン付き呼吸保護具の選定も視野に入る。

【参考文献】

- [1] PNC TN8420 88-008 「放射線管理のための表面汚染からの再浮遊係数に関する文献調査」 (旧)動力炉・核燃料開発事業団
<https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?4023319>
- [2] 「電動ファン付き呼吸用保護具」厚生労働省 職場のあんぜんサイト
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo93_1.html

(例2) 表面汚染のある場所での遠隔ロボットやドローン使用作業の場合

(解答作成の方針) 現場のルーティン的な作業においては再浮遊係数を用いて表面汚染密度から空气中濃度を推定する方法が用いられるが、今後原子力業界が廃炉・廃止措置に向かう段階においては作業自体が非定型となり、場合によりドローン・ロボット等を用いる例も多くなるため、従来「定数」として用いてきた再浮遊係数の適用範囲外となる。ここではドローン飛行による風による床面の粒子の巻き上げを風速(床面での摩擦速度)と関係づけて説明する。またダストモニタによる空气中モニタリングの課題として、時間遅れについて言及する。

大規模な原子力災害後は、建屋内の表面汚染レベルや空間線量率が高いため、ドローン等を用いて遠隔で現場状況把握を行う場合がある。一般的な放射線管理では表面密度(Bq/cm^2)に作業形態に応じて $10^{-5}\sim 10^{-7}(\text{cm}^{-1})$ オーダーの再浮遊係数を乗じて、作業時の空气中濃度を推定することが可能であるが、広範囲に汚染された空間では表面密度の把握自体が困難であり、さらに作業自体が非定型であるため、歩行、散水、ふき取り除染作業等、個別具体的な作業を想定して得られた再浮遊係数の適用範囲外となる。そのような場合においては物体表面にファンデルワールス力と静電気力によって付着した粒子が横風により剥離・再浮遊する等の物理モデルを想定したうえで、剥離現象の風速依存性(例：飛散量は表面での摩擦の約3乗に比例)や、再浮遊粒子の重力沈降の粒径依存性等のパラメータを考慮した計算を行う方法がある。

有人作業であれば呼吸保護具やタイベックスーツ着用による内部取り込み防護が留意点となるが、遠隔作業の場合はダストによる汚染範囲の拡大防止と建屋内の閉じ込め管理のためのモニタリングが重要となる。このようなダストモニタリングにおいては作業場所からサンプリング端の距離とサンプリング端から検出器までの配管長により、数10秒～分単位の時間遅れが生じるため、初めは短時間作業でモニタの上昇傾向を把握したうえで目的とする作業を行う等が留意点となる。

【参考文献】

- [1] Y. Shao and H. Lu, “A simple expression for wind erosion threshold friction velocity,” J. Geophys. Res. Atmos., vol. 105, no. D17, pp. 22437-22443 (2000)
- [2] 風による土壌の飛散に関する研究、興峰 清志、他 日本環境衛生センター(1984)
- [3] 1号機PCV内部調査にかかるアクセスルート構築作業について、東京電力ホールディングス株式会社
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/genchicyousei/2020/0219_03.pdf

Ⅱ-1-2 周辺環境におけるガンマ線の線量率に対して連続モニタリングを行う場合に用いられる2種類の検出器を選び、その原理と要求される性能等について簡潔に述べよ。

【解答のポイント】

周辺環境のガンマ線連続モニタリングには「NaI(Tl)シンチレーション検出器」と「電離箱式検出器」が最も多く用いられている。

前者はガンマ線とNaI結晶の励起作用で発生した光を、後者はガンマ線と検出器内希ガスの電離作用で発生した電子とイオン対の電位差によって流れる電流を電気信号に変換し、それぞれの電気信号の計数率に応じた線量率が測定値として算出される。

当該モニタリングの主目的として「計画外放射性物質の早期発見」及び「ヒトの被ばく評価のための材料提供」が挙げられる。これら目的を達成するため、検出器には「平常時の線量率変動を把握できる精度」と「緊急時に高線量率域まで測定できる能力」が要求されている。前者はNaIが、後者は電離箱が得意としており、これら2つの検出器の組み合わせが、モニタリングを行ううえで適当とされている。

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典ATOMICA 環境放射線モニタリング (09-04-08-02)
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-04-08-02.html

【類似問題】

・H29年度(2017年度)放射線防護Ⅱ-1-3

Ⅱ-1-3 放射線の生物影響について、酸素、温度、共存する薬剤その他の照射時の環境条件が及ぼす効果を簡潔に説明せよ。(放射線の種類、線量、線量率や、生物の年齢、組織・臓器等の感受性による効果は除く。)

【解答のポイント】

本設問においては、()書きにより、組織レベルの影響ではなく、分子レベル(DNA)での解答を求めているもの(題意)と考えられる。分子レベルの影響には、直接作用と間接作用があり、酸素、温度などは間接作用に効果が認められ、修飾作用があることが知られている。

- (1) 組織内の酸素分圧が放射線効果に影響を与えることを酸素効果といい、酸素存在下での放射線効果は、無酸素下での放射線効果に比べて大きくなる。これは、酸素存在下で水分子からのラジカルがさらに強力なラジカルになり、DNAでの損傷の固定が早く進むこと等によるものと考えられている。このため、照射時の酸素分圧により酸素効果の大きさが決まり、照射後に酸素濃度を高めたとしても酸素効果は認められない。また、同じ生物学的効果を得るのに必要な無酸素下での線量と、酸素存在下での線量の比を酸素増感比といい、低LET放射線では2.5～3程度になる。高LET放射線では酸素効果は小さい。
- (2) 温度が低下した状態では放射線効果は減少する。これを温度効果といい、ラジカルの拡散が低温により妨げられるためと考えられている。
- (3) ラジカルと反応しやすい物質が照射時に存在すれば、生じたラジカルは除去されるので放射線効果は減少する。これを保護効果といい、このような働きを持つ物質は放射線防護剤という(単に防護剤という場合もある)。
- (4) その他の影響としては、溶液を照射する場合に溶質の濃度が低い方が高いときよりも溶質に対する放射線の影響の割合が大きくなる希釈効果と呼ばれるものがある。一定の線量を照射した場合、溶液の濃度によらず生じるラジカルの数は一定であり、生じたラジカルと反応を起こす溶質の数も一定であることによる。

【参考文献/参考情報】

- [1] 放射線概論、飯田博美
- [2] 原子力百科事典(ATOMICA) 09-02-02-06「放射線のDNAへの影響」、09-02-02-10「放射線の直接作用と間接作用」
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-02-02-10.html

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-02-02-06.html

[3] 重粒子線による酸素効果とそのメカニズム、平山亮一

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjmp/34/2/34_65/_pdf/-char/ja

[4] 粒子ビームサイエンスの進歩と展望—HIMAC の成果を中心に—第 8 章 8.2.4 高 LET 領域における酸素効果、伊藤敦、平山亮一

https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/68/10/68_681005/_pdf

[5] 放射線影響における LET 効果と酸素効果、小川真理子

[6] 量子科学技術研究開発機構ホームページ

<https://www.qst.go.jp/site/qms/1593.html>

II-1-4 医療器具の放射線による滅菌について、使用する放射線の種類及び実施上の留意点を簡潔に説明せよ。

【解答のポイント】

放射線の照射により微生物の遺伝子又は細胞膜にダメージを与えることで微生物を死滅させることができ、滅菌に利用されている。その歴史は、原子力発電の歴史より古く、1956 年米国で腸線縫合糸の滅菌に電子線照射装置を利用してからである。1960 年代には国際原子力機関が国際会議を開催し、医療機器の放射線滅菌に関する指針が作成されている。

我が国では、1970 年代の使い捨て注射器等から徐々に放射線滅菌が採用され、1980 年代から大規模の Co-60 ガンマ線照射施設が、1990 年代から大規模の電子線照射施設が建設された。1998 年には当時の厚生省から放射線滅菌バリデーションガイドラインが通達され、2007 年に ISO 改訂がなされたことを踏まえて、放射線滅菌線量の設定方法が改訂されている。また、2010 年には関連する JIS が制定されている。

放射線滅菌は、滅菌の信頼性が高く最終梱包状態のまま滅菌が可能であるなどの特徴があるが、以下のような点に留意しておく必要がある。

① 線源の調達及び使用済み線源の管理の方法

線源は半減期に応じ使用期間を考慮して手配しなければならない。また、使用済み線源は日本アイソトープ協会で回収保管されているが、放射性廃棄物としての処理・処分は未だ実施されていない状況にある。

② 材料の放射線劣化

フッ化物ポリマーやセルロース等の放射線で劣化しやすい材質があり、放射線滅菌適用後の品質変化に注意する必要がある。

③ 法定主任者の選任

放射線滅菌施設は、一般に規模が大きく、専門の放射線取扱主任者の選任等が必要となる。処理量や運用管理面を考慮してアウトソーシングすることも考えられる。

④ 対象物の適用範囲

放射線滅菌の対象物は、照射線量範囲で機能低下が許容値以下のものである必要がある。

⑤ バリデーション管理

製造販売業者等又は製造業者は、滅菌バリデーションに関する品質管理(滅菌に係る構造設備、手順、工程その他の製造管理等)により、無菌性を保証する必要がある。その中で、製品適格性、設備の据付時の適格性、稼働性能適格性の確認、付着微生物数の測定等、様々な管理、文書化が要求されているため、留意が必要である。

【参考文献】

[1] 原子力百科事典 (ATOMICA) 08-02-03-01 「放射線による医療器具の滅菌」

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/uaet_detail_08-02-03-01.html

[2] 原子力利用の一つである「放射線滅菌」について (量子ビームテクノロジーの有効活用の実例)、隅谷尚一

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/53/2/53_102/_pdf/-char/ja

[3] 放射線化学第 100 号記念特集「第 II 部放射線化学の現状と展望」3. 応用 放射線滅菌、廣庭隆行

[4] 放射線滅菌製品の滅菌実務と承認申請に関する通知にかかわる対応について、(一社) 日本医療機器産業連合会

【類似問題】

・ R1 (2019) 放射線防護及び利用 II-1-3

II-2 次の2設問(II-2-1、II-2-2)のうち1設問を選び解答せよ。(青色の答案用紙に解答設問番号を明記し、答案用紙2枚を用いてまとめよ)

II-2-1 最近BNCTとともに各種悪性腫瘍に対するTAT(Targeted Alpha Therapy)の高い治癒率を示す有効な治験結果が報告されている。TATでは、Ac-225などのアルファ線放出核種で標識された薬剤を用いる。わが国でも近い将来TATの需要増加が見込まれ、原子炉や加速器を用いてAc-225やAt-211の製造方法の検討がなされている。これらアルファ線放出核種で標識された薬剤の開発製造及び円滑な供給についても確立する必要がある。あなたがこれら製造されたアルファ線放出核種を受け取り、薬剤等として加工し、医療機関等に払い出すまでの施設の放射線管理計画立案の責任者に指名されたとして、以下のことについて述べよ。

- (1) 計画立案に着手するに当たって、放射線防護及び管理上、調査、検討すべき事項について説明せよ。
- (2) 留意すべき点、工夫を要する点を含めて業務を進める手順について述べよ。
- (3) 効率的、効果的な放射線防護及び管理を進めるに当たり関係者との調整方法等、留意すべき事項について述べよ。

【解答のポイント】

上記設問に対する解答の作成にあたり、その背景となるアルファ線源の取扱いやTATを理解しておく必要がある。ここでは、その概要の解説を前段に記載した。放射線管理の責任者が有すべき基礎知識として参考とされたい。

〔概要の解説〕

■TAT (Targeted Alpha Therapy) の概要

■BNCT と TAT の差異

■アルファ線放出核種の投与量

■薬理効果

■アルファ線源の供給体制

■アルファ線源の譲渡譲受 (受入れと払出し)

■線源輸送容器： L/A(B)型

■管理区域の規模感の設定

■放射性医薬品の加工 (調製・供給) における検討項目

■その他崩壊形式の線源と比較したときのアルファ線源の優位性

■アルファ線源廃棄物の取扱い

■TAT (Targeted Alpha Therapy) の概要

がん治療に関する研究が発展し、多くの有効な医療技術が認められた昨今、外科治療、化学療法と並び、放射線治療の3種が標準治療法として日々臨床応用されている。放射線治療はさらに、身体の外側から患部へ向かって放射線 (X線、ガンマ線、粒子 (陽子、中性子、重粒子線)) を照射する外照射治療と、放射性治療薬を投与し、身体の中からがん組織を照射する内照射療法に大別される。TATとはアルファ線放出核種を標識した薬剤を用いる内照射療法を意味する用語であるが、標識する線源をアルファ線放出核種に限定せず、¹³¹Iや⁹⁰Y等のベータ線放出核種の利用を含めた場合は、TRT (Targeted Radionuclide Therapy) や核医学治療、標的アイソトープ治療といった用語が用いられる。

一般に、原料の生産とその技術開発 (一次産業)、原料の加工と品質保証 (二次産業)、製品の応用とサービスの提供 (三次産業) といった産業構造が認められているが、TAT/TRTではそれぞれ、創薬に用いる放射性核種やいわゆる化学物質の製造 (一次)、放射性核種を化合物に標識し薬物として調製 (二次)、得られた治療薬を投与し医療技術を提供 (三次) と表現できる。本設問では、主に上記した二次産業を計画立案する放射線管理責任者が採るべき行動・理解が問われている。

■BNCT と TAT の差異

BNCTでは、安定同位体の一つ¹⁰B (ホウ素10) で標識された薬剤をがん組織に集積させる。外部から速中性子を身体に向けて照射し、同粒子が薬剤中の¹⁰Bに衝突するとき¹⁰B(n, α)⁷Li反応が起こり、反跳で得られるα粒子と⁷Liが共にがん細胞に障害を与えることで薬理効果を期待する。

一方TAT/TRTでは、薬剤を放射性同位体で標識することから、同薬剤ががん組織に集積すると同時に身体の内部で目的部位への放射線照射 (TATの場合、壊変によって放出されるα粒子) を行うことができる特徴を持つ。

いずれの治療法でも、患部に対して効率的な放射線照射を行うためには、両薬剤ががん組織に集積する必要があるため、薬剤の生体内挙動を適切に設計する (薬物送達技術開発) ことが重要である。従って、両治療法とも広義には化学療法 (いわゆる抗がん剤療法) としての側面を持つ。

■アルファ線放出核種の投与量

いわゆる放射線科学の教科書では、特に内部被ばく・汚染時に、アルファ線が持つ身体への影響、即ち、放射線障害の大きさが説明される。一方で、陽電子断層撮影法 (Positron Emission Tomography; PET) や単光子放射断層撮影法 (Single Photon Emission Computed Tomography; SPECT) で利用される放射性診断薬、即ち、 ^{18}F や ^{11}C (PET)、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ や ^{123}I (SPECT) で標識された薬剤 (EC 壊変や β +壊変) は 37-740 MBq (1-20 mCi) 程度が投与されるものの、放射線に起因する障害が起こらない非侵襲性を謳っている。アルファ線放出核種の医学的な応用は、その放射線障害性の高さから人体への投与は非現実的な応用と思われていたが、世界初のアルファ線源の医学応用例として我が国でも ^{223}Ra $^{223}\text{RaCl}_2$ ($T_{1/2}=11.4\text{ d}$) が骨転移を有する去勢抵抗性前立腺がんに対して保険収載された (2018 年)。現在、臨床応用されている ^{223}Ra $^{223}\text{RaCl}_2$ の投与量は体重 1 kg あたり 55 kBq (60 kg 換算で 3.3 MBq) であり、4 週間間隔で最大 6 回までの投与が行われる。また、設問にもある通り、 ^{211}At ($T_{1/2}=7.1\text{ h}$) や ^{225}Ac ($T_{1/2}=10\text{ d}$) といったアルファ線放出核種で標識された新規薬剤に関する治験が世界中で盛んに行われている。上述する診断薬と異なり、アルファ線放出治療薬はがん組織の殺傷、即ち、侵襲性を主作用 (薬効) としていることから、教科書が示すとおり、投与量は少ないもののアルファ線が生体組織へ及ぼす影響は大きい。従って、放射性物質の体内挙動を十分に制御できる、薬剤としての性質を保証することが、アルファ線放出核種の医学応用において最も重要な検討項目と言える。

■薬理効果

TAT の実践では、放射性物質の物理的な特性と、薬物が有する化学的・生物学的特性の相乗効果によって治療効果を望む点に特徴がある。即ち、アルファ線の飛程の短さと線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer; LET) の高さが挙げられ、具体的には、アルファ線の組織内飛程は約 100 μm 程度、細胞 10 個分程度であり、ここに約 5-9 MeV 程度の放射線エネルギーが付与される。この結果、がん細胞内の DNA・二重らせん構造が直接、及び二次的な放射線 (二次電子、ラジカル等) によって障害されることで細胞死を誘導し、治療効果が得られると考えられている。従って、目的とするがん組織へ薬剤を送達・集積することが出来れば、極めて効率的な照射をすることが可能となり、低 LET に分類されるベータ線放出核種で標識された薬剤よりも治療効果を高める期待が持たれる [1]。また、短い飛程は遠方にある正常組織への望まない照射を限定することにも繋がり、いわゆる放射線障害による副作用の発生を低減することも期待される。

■アルファ線源の供給体制

2023 年現在、医学的利用 (治療) を目的としたアルファ線源の商業的な国産化は行われていない。市場 [2]、[3] に流通するアルファ線源は全て輸入品となり、流通時間に耐えうる十分に長い半減期を有するもの (^{223}Ra 、 ^{225}Ac) に限られている。また、 ^{225}Ac に関して、世界的な需給バランスの不均衡から当該輸入線源の定期・計画的な入手については不安定な状況が続いている。従って、現実的な TAT 実践の計画立案を行う場合、アルファ線源の製造を行っている施設との共同等による安定した入手経路の調整が求められる。具体的な入手可能性として、国内の主な加速器施設が協同する At-211 の製造・使用・頒布を行う例 [4] の他、Ac-225 についても一部の施設が試験的な製造を試みている例が挙げられる。但し、現段階ではいずれの場合も高頻度かつ臨床利用を可能とする体制とはいえず、アルファ線源の将来的な利用拡大・TAT 実践の活性化に資する供給体制の強化が国の内外を問わず望まれている。

■アルファ線源の譲渡譲受 (受入れと払出し)

譲渡譲受に関して、アルファ線源とそれ以外の線源で異なるものは、輸送物表面密度である。アルファ線を放出する放射性同位元素を輸送する場合、輸送物表面の密度限度は 0.4 Bq/cm² となる (アルファ線を放出しない放射性同位元素の場合、4 Bq/cm²)。表面汚染物に関しては別の区分があるが、ここでは割愛する。

■線源輸送容器： L/A(B) 型

設問から想起されるアルファ線源の受入や払出条件で、利用が想定される輸送物の区分は L 型輸送物あるいは A 型輸送物である [5]。核種、性状 (固体・液体・気体)、容器によって、L 型・A 型各輸送物の放射能上限値は異なる。

L 型輸送物は A 型輸送物と比べて低い放射能を運搬するための区分であり、固体であれば A 型輸送物の 1/1000、液体であれば 1/10000 の放射能を運搬可能である。

L 型輸送物、A 型輸送物共に包装基準があるため、それを満たした形態とする必要がある。また、A 型輸送物の場合、輸送物に対して散水試験、自由落下試験、貫通試験および圧縮試験を行い、安全性が損なわれない仕様を有していることが求められる。放射能の多寡により輸送コストが増減することから、取扱う規模に応じた輸送形態を適切に選択する。

■管理区域の規模感の設定

加工者として取扱う線源の規模感・頻度によって管理区域のキャパシティ、即ち、非密封取扱い許可量が決定される。現在、ヒトへの投与がなされている ^{223}Ra (3.3 MBq/ 60 kg) や ^{225}Ac (8 MBq/ 60 kg) の例を参考に、バッチごとの製造本数 (試験検体など含む) や製造時の放射能ロスを勘案して 1 日最大使用数量を決定し、製造頻度 (5 回/週、1 回/月など) を元にして 3 カ月最大使用数量および年間最大使用数量を決定する。使用数量が多くなるほど排気・排水設備に加え、ドラフトチャンバーやグローブボックス、ホットセルなどの遮蔽体も大掛かりなものが必要になる。想定される使用数量から、作業者の被ばく線量 (外部被ばく+内部被ばく)、排水中の放射能濃度、排気中の放射能濃度などを評価し、さらに一定の安全率を上乗せすることで、これら設備の仕様を決定する。

■放射性医薬品の加工（調製・供給）における検討項目

冒頭に述べたように、事業主体を3者（線源生産者・加工者・使用者）に区別したとき、本設問で求められている加工者の立場で検討すべき課題・項目を示す。

放射線防護及び管理において、いわゆる法規制面（使用核種・量、貯蔵能力）での承認を得ると共に、施設・設備面のハードウェアに関する準備が求められる。具体的には、日々の作業における被ばく低減・汚染回避を目的とする設備類（グローブボックス、ドラフトチャンバー等）、安全確認のための放射線測定器類（ α 線検出用 ZnS シンチレータ、 α 線スペクトロメーター、 α 線検出可能なハンドフットクロスモニター、ラジオ TLC 等と、これらの定量限界の評価）等が該当する。

また、実践に即した作業内容の明文化を行い、属人的ではない組織としての管理体制の確立が求められる。具体的には、排気及び排水設備に関する管理体制の手順化と定量限界の評価、汚染拡大防止策の徹底（汚染の可能性が高い場所のろ紙養生、作業動線の策定、汚染検査手順等）、放射線障害予防規定に従う定期的な測定・汚染検査、並びに個人被ばく管理、施設や設備の計画的メンテナンス、機器点検・校正の実施方法や頻度の策定、定期的な教育訓練による安全意識の更新と徹底等、運用体制の策定が挙げられる。これら作業の多くは、一般的な放射線管理区域を運用する場合にも求められる普遍的なものであり、アルファ線放出核種の扱いに限ったものではない。準備・整備・管理・運用は施設管理責任者によって確実に実践されることを周知徹底し、全作業者が当該規定から逸脱することなく、安全な作業が営まれる状態を維持・管理する必要がある。

一方で、TAT の有用性が報告されてからまだ日が浅いため、既存の施設・管理区域、及び作業者の多くはアルファ線源を扱ってきた経験に乏しく、絶対数も多くない。したがって、取扱うアルファ線源の特性に関する情報や注意事項、ノウハウ等の共有も、他の核種との比較で相対的に劣っていることが懸念される。安全・確実な線源取扱いにおいて、これらの情報・経験は非常に役立つことから、他施設間との積極的な情報交換・収集と共に、得られた情報を自施設で速やかに水平展開することが望ましい。

■その他崩壊形式の線源と比較したときのアルファ線源の優位性

核医学治療で用いるアルファ線源に限れば、1回あたりに使用する放射能の少なさに加え、同時に放出されるガンマ線のエネルギー・割合が比較的低いため、一般的な作業時に受ける被ばく線量は低く抑えられる印象がある。無論、非密封のアルファ線源が持つ危険性に変化はなく、粗雑な取扱いを許容するものではないが、直接的な数値としても現れる作業時の被ばくが低減できる特徴は、アルファ線源の優位性のひとつとして数えても良いだろう。

一方で、非密封アルファ線放出核種の使用は施設仕様や運用負荷を高めることから、他の壊変形式の線源と比較すると多くの使用量を取得できない。ところが上述するように、アルファ線治療に用いる放射能（1回投与量）は比較的小量であり、PET/SPECT 診断やベータ線治療に用いる放射能と比較すると1、2桁低い場合が多く、許可量と使用希望量の差異を相殺できる可能性がある。運用の規模感を十分に検討することで、実践的な運用計画を立てることが出来る。また、従前の国内におけるアルファ線源の管理体系は、いわゆる長寿命アルファ線源を想定したものであり、医療に供する短寿命核種に適用すると過剰な管理になることや、使用及び管理に伴う作業の非効率化に繋がることが指摘されている。安全性を十分に担保しつつ、合理的な運用を検討するためのガイドライン[6]も発出されていることから、当該ガイドラインを事業計画に反映させることも放射線管理の負荷軽減に対して有効な手段になると考えられる。

■アルファ線源廃棄物の取扱い

アルファ線源の使用時に特有な要求事項のひとつに、廃棄物の取扱いが挙げられる。現在、公的機関によって行われている放射性廃棄物の廃棄委託において、 ^{223}Ra 以外のアルファ線源は引取り（回収）が行われていない[7]（密封線源を除く）。ここには、いわゆる実験室内で発生する直接的な廃棄物・汚染物（化学物質や実験器具、動物等）のみならず、排気設備におけるフィルター等も含まれる。したがって、アルファ線源専用の管理区域（実験室と付随する排気設備）を準備し、他の核種を扱う実験室とは物理的な区別を容易に行える施設・運用計画が望ましいと言える。同時に、自施設内にアルファ線源廃棄物保管体制を準備し、保管廃棄物の交叉汚染が起こらない保管場所・方法・期間を定め、定期的な記帳、記録の確認を行うこととなる。

以下に、本問に対する解答例を記載する。

【解答例】

まず、調査、検討すべき項目として、①許認可案件、② α 線放出核種の安全取扱いに必要となるハードと③ソフトに関する3点が挙げられる。

① 許認可案件

- ・ 自施設が受入／使用などを予定する α 線放出核種に関する許可状況の確認が必要である。貯蔵数量、使用数量（1日最大使用数量、3か月最大使用数量など）や許可証記載の付帯条件有無などが該当する。
- ・ 自施設の使用許可に係る申請書には、空气中濃度、排水濃度、および排気濃度に関する評価値が記載されているため、それらを把握しておくと実際に使用を開始した後の実測値との比較、評価も可能となる。また、外部被ばくや内部被ばくの予測値を評価した細かい条件（ドラフトチャンバー、グローブボックス使用の要否やその性能など）も把握することができる。
- ・ 仮に貯蔵能力や許可使用量などが不足しているようであれば、変更申請が必要となる。申請後に許可を得るまで時間を要するため、早めに調査を進めておくことが望ましい。

② α線放出核種安全取扱いに必要となるハード（施設設備・機器）の調査

- ・ α線放出核種取り扱いの際、内部被ばくを回避する工夫が重要である。作業者の安全を確保できるドラフトチャンバーやグローブボックスを備えていることを確認する。未整備の場合、所定の性能（例：申請書で空气中放射能濃度を評価した際に設定した外部への放射能漏洩率を満たした性能など）を有する設備を新規設置する。
- ・ 施設の排水設備、排気設備に備わる放射能濃度測定モニターが、α線放出核種の排水中および排気中放射能濃度限度を測定可能か（検出限界・検出下限値）調査する。α線放出核種は放出に関する濃度限度値が厳しく設定されているため、測定器の性能が低い場合、検出下限値が濃度限度値よりも高くなる恐れがある。当該測定モニターが十分な検出性能を有していない場合、検出器の変更あるいは別の手法で濃度を評価するシステムが必要である。
- ・ 汚染検査において、α線放出核種の検出を可能とする ZnS シンチレーションカウンタやα線を検出可能なハンドフットクロズモニタなどを準備する。これらは常に使用可能となるよう点検や校正を行い、性能維持に努めることが重要である。
- ・ ドラフトチャンバー内や床面に予め、ろ紙を貼付（養生）することで汚染拡大を防止するとともに、汚染の除去を容易に実行できる。このような汚染拡大防止に役立つ手法を調査しておくことが望ましい。ただし、ろ紙は発塵を伴うため、医薬品製造において高い清浄度を必要とする区域で利用する際には注意を要する。
- ・ 差圧管理は放射性医薬品製造に重要な管理項目である。通常、放射性同位元素使用室は陰圧管理がなされる一方、医薬品製造区域は清浄度管理が必要であるため陽圧管理となる。放射性医薬品製造を行う区域は、この相反する条件を両立させている。様々な方法があるが、例えばHEPA フィルタ付安全キャビネットのように作業者の安全を確保（外部にRI が漏出しづらい）しつつ、内部の清浄環境を維持できる（HEPA による空気ろ過、外気が作業領域に流入しないよう扉開口下部で吸引）装置導入などがある。適切なハードウェアを導入し、後述する③の運用手順化と併せることで実践的かつ合理的な解決法を策定する。

③ α線放出核種安全取扱いに必要となるソフト（運用・ドキュメント）の調査

- ・ 使用計画書を作成し、取扱数量、作業スケジュール、使用場所や設備、人員配置、予測被ばく線量などを責任者が事前に把握できるシステムを構築する。責任者は人員配置や被ばく線量などに特に留意し、必要に応じて計画の見直しを行う。
- ・ 使用に関する手順確立に加え、放射線防護や管理に必要となる設備や測定器などの機器管理に関わる手順も確立する。いずれの手順も文書化し、状況に応じて改定していくことが望ましい。
- ・ 放射線管理に必要となる記帳・記録類の書式を定める。既存の書式があればそれを流用することが望ましい。使用の他、環境測定（空間線量率、汚染の状況測定、空气中放射能濃度など）の記録作成、確認および保管方法もルール化しておく。
- ・ 取扱うアルファ線源の物性（半減期や揮発性の有無、安定した保存方法、子孫核種の有無、混入の可能性がある微量な放射性不純物の組成等）や安全な取扱いに資するノウハウ等、放射線防護に有益な情報入手に努めると共に、線源加工に従事するスタッフの選任と継続的な教育訓練による安全意識の徹底を図る。

【参考文献】

- [1] C. Kratochwil et al., J. Nucl. Med. 57 (2016) 1941-1944
- [2] 公益社団法人日本アイソトープ協会 放射性試薬の総合情報サイト <https://j-ram.org/>
- [3] 2019 年度 RI 製造・利用調査報告書 Radioisotopes 70 (2021) 251-260
https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/70/4/70_700405/_pdf/-char/ja
- [4] 短寿命 RI 供給プラットフォーム <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~ripf/>
- [5] アイソトープ輸送ガイド https://www.jrias.or.jp/books/pdf/yusoguide_201809_n.pdf
- [6] 短寿命放射性同位元素の合理的な安全確保のための許可・信頼性担保・教育訓練等に関するガイドライン <http://jsnm.org/archives/6061/>
- [7] 日本アイソトープ協会 ; RI 廃棄物の廃棄委託規約 <https://www.jrias.or.jp/waste/cat1/202-11.html>

- II-2-2 高エネルギーの重荷電粒子線を種子等に照射することで、効率よく植物の突然変異体を誘発することが可能である。重荷電粒子線を用いた放射線育種の技術開発と大型放射線発生装置を用いた放射線育種の実施を管理・運用するためのプロジェクトチームが設置された。あなたがそのプロジェクトを遂行する責任者として業務を進めるに当たり、以下の内容について記述せよ。
- (1) 放射線育種の技術開発と管理・運用の計画の策定に当たり、調査、検討すべき事項について説明せよ。
 - (2) 留意すべき点、工夫を要する点を含めて業務を進める手順について述べよ。
 - (3) 業務を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方策について述べよ。

【解答のポイント】

近年、高エネルギーの重荷電粒子線を植物や微生物に照射して突然変異を誘発する技術を活用した放射線育種が行われている。一般に、ガンマ線を照射する方法に比べ、重荷電粒子線を用いた放射線育種には以下のような特徴がある。

- 1) 線エネルギー付与（LET）が高い。
 - ・ 欠失変異の割合が高く、極低線量でも決定的な変異を生じやすい。
 - ・ 線量あたりの突然変異率が高い。
 - ・ 変異の幅が広く、新たな形質が得られる可能性がある。
- 2) 照射する核種やエネルギーの選択が可能である。
 - ・ 国内で4つの加速器施設（RIBF、TIARA、W-MAST、HIMAC）が用いられている。
 - ・ 施設ごとに用いる核種が異なる。炭素、窒素、ネオン、アルゴン、鉄などが主に用いられてきた。
 - ・ 加速電圧を変えることにより比較的容易に照射する核種のエネルギーを制御することができる。
- 3) 照射方法や照射時期に制限がある。
 - ・ 施設によって異なるが、照射野は直径4～9 cm程度である。
 - ・ ガンマ線に比べて透過力が低いため、試料調整を工夫する必要がある。
 - ・ ガンマ線に比べて利用時間が限られている。

放射線育種の技術開発や管理・運用計画の策定にあたっては、上記のような重荷電粒子線照射の特徴を踏まえ、調査・検討を進めることになる。題意からは明確に読み取ることができないが、ここでは大型放射線発生装置が既に設置された状態からの業務を対象として、調査・検討を進める事項を挙げてみた。

① 育種目標、材料の設定

一般に、放射線育種においては望むべき特性を持つ突然変異体が得られるとは限らず、また、そのような突然変異体が得られるとしてもその頻度は決して高いものではない。従って、育種目標の設定にあたっては、それが達成できる可能性を先行事例等を調査して検討しておく必要がある。また、予想される獲得頻度をもとに、望むべき特性を持つ突然変異体を得るためにはどの程度の規模の変異集団を用意する必要があるかを検討しておく必要がある。さらに、照射する材料に育成者権が存在する場合は、得られた突然変異体の実用化にあたって許諾料の支払いが必要になる可能性があるため留意が必要である。

② 照射試料、照射強度の設定

利用する照射装置の特性に合わせて適切な試料調整方法を検討しておく必要がある。また、照射強度が高い方が変異の導入量は多くなるが、変異の導入量が多すぎると元の材料の特性が損なわれる可能性も高まるため、予備的な試験で適切な照射強度を検討する必要がある。

③ 大型放射線発生装置の安全管理に関する事項

遮蔽、照射中のインターロック、試料の放射化に関する事前評価、試料を管理区域外へ搬出する際の確認など、大型放射線発生装置使用時の安全管理を関係者に徹底する必要がある。

④ 育種事業者との調整について

育種事業者と連携して業務を進める場合、相互にその効果を確認しながら技術開発を進め、照射材料や照射強度、突然変異体の選抜方法など、常に改善を図ることが重要である。

突然変異は様々な形で現れることになる。偶然、求める性質を持つ突然変異体が発見されることもあるが、効果的、合理的に育種技術の開発を進めるためには、照射強度と形質の変化を観察し、効果的な照射条件を早く見出すことや、ゲノム情報なども考慮して求める性質が発現する生理的・遺伝的背景を理解することが、開発を進める上で重要なポイントになる。また、植物の成長を待たず、できるだけ早期に求める性質を有する個体を判定する手段などがあれば、効率的に放射線育種の技術開発を進める上で有用な情報となるため、他の育種技術に係る情報などの周辺技術を含めて情報収集しておきたいところである。

放射線育種技術を広く利用してもらうためには、放射線に関する知識や生物に対する影響など、基礎的な知識について理解を得られるよう努力することが望ましい。既に放射線育種の事例は多くあるが、その事例の紹介や放射線育種技術について報告する機会を設けたり、SNS などを利用すること、個別相談や訪問など、理解促進のための活動を継続的に実施することが望ましい。

【関連問題】

- ・ H29 年放射線利用Ⅱ-1-2
- ・ R4 年放射線Ⅱ-2-2、Ⅲ-1

【参考文献】

- [1] イオンビーム育種技術の特長と産業利用、長谷純宏、化学と生物 Vol. 52、No.10、2014
- [2] イオンビーム育種技術の開発に取り組む加速器施設、阿部知子ほか、AGRICULTURAL BIOTECHNOLOGY Vol. 6(12)、2022
- [3] 放射線概論 第6版、通商産業研究社

6. 選択科目Ⅲの解説

6.1 「原子炉システム・施設」の問題と解答のポイント

Ⅲ 次の2問題(Ⅲ-1、Ⅲ-2)のうち1問題を選び解答せよ。(赤色の答案用紙に解答問題番号を明記し、答案用紙3枚を用いてまとめよ。)

Ⅲ-1 あなたの勤務する発電所(運転開始から30年経過)において、安全系以外の多くの系統で多数用いられているポンプの消耗部品を製造しているメーカーが撤退し、消耗部品の供給を受けられなくなる状態となったときを想定し、以下の設問に答えよ。

- (1) 発電所設備を維持・運転していくための課題を、技術者としての立場で多面的な観点から3つ抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、これを最も重要とした理由を述べよ。その課題に対する複数の解決策を、専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示した解決策に関連して新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策について、専門技術を踏まえた考え方を示せ。

【解答のポイント】

原子力発電所の新規建設が途絶え、再稼働したプラントも半分程度の現状においては、①部品供給メーカーの撤退、廃業による製造中止品の発生、②事業の将来性や採算性の観点から雇用継続による人材確保に支障が生じ、事業継続そのものが困難となるケース、③ITによる人材育成の機会がなく、ノウハウといった技術力の維持が困難であること、④素材や部品の一部の調達先が撤退することによって機器の供給そのものが困難になる、という課題に直面している。これに対し、事業者のみならずプラントメーカー等を含め、様々な対策が行われているところであり、それらを参考に解答する。

(1) 発電所設備を維持・運転していくための課題

① 製造中止に係る関連情報の入手、分析

製造中止の影響として、部品供給メーカーの撤退、廃業により機器の構成部品を調達できないことのほか、機器のモデルチェンジ等により、同一仕様での機器、部品が供給できない、保全時の技術サポートを受けられないなどの様々な状況が想定される。

設備の劣化状況、設置年などの施設情報に加え、設計等を要する場合も想定されることから、早期に情報を入手する必要がある。

② 対策方針の策定

市中在庫品等の確保(事業者間、プラントメーカー等の協力を含む)、特別生産、設備更新、リバーエンジニアリング、設計変更など、どのような対策を講じるか、関連設備の状況、市場の状況などに応じ、方針を検討することが課題となる。

③ 対策を実行するための人的資源の確保と力量管理

従業員の高齢化、若手人材の確保難及びこれに伴う、技術伝承の困難さが関連し、上記方針に基づいて対策を実行するための人的資源の確保と技術伝承、力量付与が課題となる。

(2) 最も重要とした理由。その課題に対する複数の解決策

重要と思われる課題の選定にあたっては、重要と考えた理由に言及しつつ、評価の資質能力を認めてもらえるよう心掛けるとよい。いずれを選択したとしても、複数の解決策の提示を求められていることについて、留意する必要がある。ここでは、製造中止品の対策方針の策定を最重要課題とし、解答例を示す。受験者自らの経験を踏まえ、専門技術用語を交えて提案するとよい。

《解答例》

各事業者やプラントの状況に応じて様々な選択肢が考えられること、他事業者、プラントメーカー等の調整・協力を要すること関係機関等との対策方針の策定を最重要課題として選定し、以下にその解決策を述べる。

1) 市中在庫品の確保、特別生産による同仕様品の確保

- 他事業者やプラントメーカー、協力会社等に情報提供を求め、融通可能な保有在庫を確保する。一定程度の入手が可能な状況であれば、市中在庫品を融通する方法は比較的簡便である。
- プラントメーカーやサプライヤと特別契約を結ぶことで、公開情報では生産終了になっているものであっても生産可能な場合があり得る。この場合、市場流通していた時期と比べ、生産ラインの維持や、定期購入等の約束事項など供給者の都合に応じた対応が必要になると予想され、市場流通時よりは割高となることを想定しておく必要がある。

2) 既存部品の修理による継続使用、リバーエンジニアリングによる同等品の製造による代替

- 製造がない場合であっても、整備により使用が可能となる場合には、修理、整備を繰り返すことにより延命させる手段が考えられる。長期保守契約を結ぶことも手段の一つとなる。

また、一部のサプライヤによる製造中止なのであれば、同業他社などに協力を求め、リバーエンジニアリングにより当該製品の生産に必要な技術仕様の分析を行い、他社の製品により代替する方法が考えられる。一般産業工業品を流用する場合には、当

該製品に関し技術的な評価を行っておく必要があることに留意しておく必要がある（「原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則の解釈（令和元年12月）」）。

3) 設計変更を含め、設備更新を行う。

- 製品の代替による対応が難しい場合には、設計変更を行い、必要な性能を確保した上で、系統設備を更新することが考えられる。この場合、「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」等に従って設置することや許認可手続きなどを考慮して計画する必要がある。

なお、策定した対応方針に基づいて対応できないケースも考えられることから、定期的にレビューし、見直し、改善を図ることが、その後の取組みにおいて、重要になる。

(3) 新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策

挙げた対策を踏まえても様々な懸念が生じうる。受験者自らの経験を踏まえ、専門技術を踏まえた考え方を示すとよい。

また、製造中止品の発生は、問題で想定されている安全系以外のポンプに限ったものではない。安全上重要な設備における一般産業用工業品の採用に関し、日本電気工業会にて「一般産業用工業品採用ガイドライン」がまとめられており、解答にあたり参考にするとよい。

「将来的な懸念事項①」

在庫品、代替品の確保を対策としていた場合、社会環境変化、国際情勢等の変化によるサプライチェーンの確保が困難になることや、それを受けて期待していたプラントメーカー、サプライヤーが撤退へと経営方針を変更することなどが考えられる。

「対策」

サプライヤー等撤退時に、当該製造者と交渉し、製造技術を移転する。具体的にはプラントメーカーが直接製造する。または、同種のサプライヤーの統合により収益性を確保して事業を継続する。或いは設備更新等の別の選択肢へ対応方針を検討する。

なお、一般産業用工業品を採用した場合、原子力施設に要求されるトレーサビリティや変更管理、不具合対策（不適合管理）などの要求を満足するよう配慮する必要がある。

「将来的な懸念事項②」

設計変更を伴う場合においては、設計経年化により、新旧の設計で機能に差異を生じ、個別の特性や安全機能に影響を及ぼすことが考えられる。

「対策」

設計変更の際に、新旧の設計（設計図書の記載事項、各設備等の物理的構成・形状、当該安全機能に期待される個別機能及び特性、信頼性を決定する要因等に関する設計情報等）を比較して、設計差異を整理すると共に、確率論的リスク評価やストレステスト等の安全裕度の評価により、検証して設計を変更することが考えられる。

なお、設問において、専門技術用語を用いることが要求されている。保全プログラム、保全重要度、運転期間の制限など、通常現場で用いられる用語、原子炉プラント設備の消耗品の具体的名称などの例示を含めれば、専門技術用語の使用等の要求については解消できるであろう。

【参考文献】

- [1] 製造中止品管理ガイドライン、2020年9月、原子力エネルギー協議会
- [2] 原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則の解釈
- [3] 実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- [4] 設計の経年化評価ガイドライン、2020年9月、原子力エネルギー協議会
- [5] 一般産業用工業品採用ガイドライン、2023年10月改正、日本電機工業会

III-2 令和5年2月に閣議決定された『GX実現に向けた基本方針』には「エネルギー基本計画を踏まえて原子力を活用していくため、原子力の安全性向上を目指し、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む。」との記述に続いて「廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建て替えを対象として、（中略）具体化を進めていく。」との文言が記述されている。このような状況を踏まえて、原子力分野の技術者として、以下の問いに答えよ。

- (1) 国内で次世代革新炉を新規に建設する場合、技術者としての立場で多面的な観点から3つの課題を抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、これを最も重要とした理由を述べよ。その課題に対する複数の解決策を、専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示した解決策に関連して新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策について、専門技術を踏まえた考えを示せ。

GX実現に向けた基本方針は、問題文にあるように令和5年2月に策定されたばかりであり、本設問は今後この基本方針に示されたことをどのように実現していくかについて、原子力分野の技術者としての見解を求めた問題と考えられる。

次世代革新炉については、世界のエネルギー情勢が不安定なことや、福島第一原子力発電所の事故からくる安全性への要求の高まり、或いは事故時の影響を小さくすること、核燃料サイクルの確立、水素社会との併存など、幅広い観点から構想が提案されているところである。

順序立てて、新規建設を検討する場合には、まず、立地条件、炉型選択を行い、設計や建設が行われると考えられる。

次世代の原子炉については、改良型の軽水炉もあれば、新しい方式の原子炉も考えられ、どの範囲を革新炉という定義は曖昧さがあるが、ここでは許認可に係る審査の基準がないようなものを想定しておくのが自然であろう。

以下に、想定される課題と考慮が必要と考えられる事項を挙げておくので参考にしてもらいたい。

自らの知識、業務経験に基づいて、最重要課題、解決策、懸念事項など、整理しておいたものを論述する。革新炉では、自ずと専門技術用語を含むことになるため、専門用語の使用については、余り意識する必要はないと思われる。

【炉型選択に関すること】

炉型選択にあたっては、いくつか検討すべき視点がある。

- ・ 設置基数との関係もあるが、電力需給見通しを踏まえた上で、必要出力（目標出力）をどの程度とすべきか決定しなければならない。小型のもので良いとするのか大型のものとするのか。他のエネルギー源との関係を含めること（原子力の割合をどの程度とするか）、何年程度の運転を想定するかなど。
- ・ 福島第一原子力発電所事故については、国民の立場からすると大きなインパクトがある。少なくとも原子炉の安全性については、その向上策や事故対策、影響低減などの方策を講じたものでなければ、立地は認められないと考えられる。
 - ▶ 炉型と併せて考慮しておく必要があるのが、燃料の調達（サプライチェーン）やその製造技術の確立である。ジルカロイ-水反応を抑制する事故耐性燃料についても国際的に研究開発の動きがあり、その採否についても考慮に入れなくてはならない。
 - ▶ その他、シビアアクシデントへの対策として、コアキャッチャーのような技術の採否を考える必要があるだろう。
- ・ 高速炉プロジェクトについては、世界的なウラン需要増を見越し、（狭義の）核燃料サイクルを確立しておくことが重要であり、そのスケジュールのなかで実証炉・商用炉を段階的に進めなければいけないことを考慮する必要がある。
- ・ 革新炉については、規制基準が整備されていない。事業者からの申出があつて初めて審査方法や基準について検討するようでは、時間がかかることが想定される。当初から規制の枠組みを整備するような動き、国を挙げての調整を進める必要があると思われる。また、具体的に審査を行うためには、海外の基準、実態調査など事前準備が必要となるであろう。
- ・ 軽水炉で使用した使用済燃料については、六ヶ所村で再処理施設、MOX加工施設の建設が進められているが、革新炉に対しての核燃料サイクルの成立性、見通しについても考慮されるべき事項であろう。少なくとも、相当量の使用済燃料が国内に存在し、プルトニウム利用を進めなければならないという背景を理解しておく必要がある。
- ・ このほか、高放射性廃棄物の発生量低減を考慮するか等との関係もある。

【立地・建設に関すること】

福島第一原子力発電所の事故により、かなりの国民がその安全性への懸念などから原子力事業に対して否定的となっていることを考慮しておく必要がある。立地の了解や着工までにはかなり時間を要することも想定される。このことから、問題文にもあるように、有力な立地サイトとして、廃炉を決めた発電所サイト内が挙げられる。

- ・ 前述の必要出力（目標）や基数との関係もあるが、いずれにしても候補となるサイト、建設場所を選定していくことになる。如何にサイトを選定していくか、地元同意のプロセスも含めて課題があると考えられる。
- ・ 廃炉と並行して進めることとなった場合、サイト内の管理、例えば、共用施設の利用（電源、ユーティリティ系、廃棄物処理施設、使用済燃料の貯蔵管理やスペースなど）をどのように考えるかや、工事期間中の核物質防護管理、テロ対策を合わせて考える必要がある。
- ・ 数多くの建設資機材、重機などが必要となるため、物流、動線を含めた工事の錯綜などが考えられるため配慮が必要であろう。既設の廃止措置に伴い、再利用可能なクリアランス資機材、跡地スペースなどがあれば、その利用を考えたいところである。

【安定操業に向けて】

上記のこととも関連するが、建設以降の運転・操業が安定的に進められるように配慮しておきたいところである。例えば、

- ・ 差止請求があった場合に、十分な技術的根拠を用意しておくこと
- ・ 設備診断技術を駆使し、メンテナンス性の向上を図り、設備の余寿命評価ができるように配慮しておくこと
- ・ 運転中のリスク評価とリスク情報の活用（PRA等の情報活用）
- ・ 燃料交換の頻度を少なくする、定期事業者検査など事業者検査の対応が非合理的にならないように配慮すること
- ・ 人材育成、人材確保に関すること

上記以外にも、軽水炉系の炉型と第4世代特定の炉型を想定し、例示的な記述での答案構成も考えられる。GX基本計画で冒頭に記載されているエネルギー安全保障、カーボンニュートラルの実現という大きな目標に対し、CO₂排出がない原子力エネルギーの利点を活かし、持続可能性（資源有効利用、環境負荷低減）を確保することを前提とした上で、以下のような流れの答案構成も考え得る。

【例示1】

- 1) 次世代革新炉は次世代軽水炉及び第4世代原子炉に大別されるが、ここでは、より多くの課題があると思われる第4世代原子炉を例に、重要な課題と解決策を示す。
- 2) 第4世代原子炉には、ナトリウム冷却高速炉、重金属冷却高速炉、ガス冷却高速炉、超臨界軽水炉、熔融塩高速炉、高温ガス炉等がある。冷却方式、中性子利用のエネルギー帯のほか、安全上の特性が通常の軽水炉とは大きく異なり、その安全メカニズムには、それぞれの炉の特性に応じて確立する必要がある。また、高温ガス炉以外は原子炉によるエネルギー供給の持続可能性に対応した概念であるが、それに加え、高温ガス炉では水素製造等の多目的利用が期待されている。
- 3) 第4世代原子炉においては、特に軽水炉と同等以上の安全性、経済性、保守（補修）性を確保すること、その信頼性、確実性を示し認可、地元了解を得ることが重要な課題となる、等。

【例示2】

- 1) 次世代革新炉は次世代軽水炉及び第4世代原子炉に大別されるが、ここでは、より早期に実現可能と考えられる次世代軽水炉を例に、重要な課題と解決策を示す。
- 2) 次世代軽水炉では、その出力規模にもよるが、福島第一原子力発電所事故を踏まえた、「地震、津波等の自然災害に対する耐性の強化」、「安全システムの多重性・多様性・独立性強化、組合せによるシビアアクシデント防止対策」、「炉心溶融時への備えとしてのコアキャッチャーの設置等の事故対策」などの安全性強化のほか、「サイバーセキュリティシステムの強化」を含めた最近のテロ攻撃への対処などを具体化することが求められる、等。

【参考文献】

[1] GX実現に向けた基本方針

[2] 原子力委員会ホームページ

<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/ketteibun.htm>

- ・ 原子力白書
- ・ 原子力利用に関する基本的考え方など

【類似問題】

- ・ R1年度（2019年度）原子炉Ⅲ-1
- ・ R4年度（2022年度）原子炉Ⅲ-1

6.2 「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」の問題と解答のポイント

Ⅲ 次の2 問題（Ⅲ-1、Ⅲ-2）のうち 1 問題を選び解答せよ。（赤色の答案用紙に解答問題番号を明記し、答案用紙 3 枚を用いてまとめよ。）

Ⅲ-1 令和 3 年 10 月に閣議決定された「エネルギー基本計画（第 6 次）」によれば、原子力は安全性の確保を大前提に、長期的なエネルギー供給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源とされており、2030 年の電源構成で 20～22%程度と見込まれている。原子力の利用を安定的に進めていくためには、原子力発電所の再稼働を目指すだけでなく、使用済燃料対策、核燃料サイクル、最終処分、廃炉等様々な課題が存在しており、こうした課題への対応が必要とされている。

このような状況を踏まえ、核燃料サイクル及び放射性廃棄物の技術者として、以下の問いに答えよ。

- (1) 核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分の課題を、技術者としての立場で多面的な観点から 3 つ抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を 1 つ挙げ、これを最も重要とした理由を述べよ。その課題に対する複数の解決策を、専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示した解決策に関連して新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策について、専門技術を踏まえた考えを示せ。

【解答のポイント】

核燃料サイクル全般についての課題を広く上げた上で、この選択科目を選んだ技術者としての立場で解答が可能な問題となっている。

受験者各位は専門分野や通常業務での担当分野について常日頃、考慮していることについて、技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）の何が問われているか念頭に置いて解答構成を考えると良い。

(1) については、何を挙げてもよさそうではあるが、多面性を要求されているので、解答の選択肢が多いことから、その課題を抽出した観点を明確にし、その論理的考え方、課題の複雑さや専門とする分野全体を見通した視野の広さを示せるような答案を心掛けたいところである。ただし、注意しておきたいのは、問題文に既に記載されている事項を挙げ、それが課題であるとするトーンでは解答にならないので、注意したい。また、「多面的な」とあるので、選んだ課題が偏らないようにも配慮したい。「使用済燃料対策、核燃料サイクル、最終処分、廃炉等」を念頭におきつつ、なるべく多くの側面（広めの視点で良い）からの課題を挙げておきたいところである。

(2) については、抽出した最重要課題に関し、最重要であるとする根拠を論理的に説明できるか、課題解決策について、複数の解決策を示せるかどうかポイントとなる。自らの得意な領域に誘導するような理由付けを行い、論述すると答案の物量や専門技術用語を用いることについても、問題なくクリアできると考えられる。

例えば、課題の抽出にあたっては、

- 1) プルサーマル利用との関係、六ヶ所再処理工場が未だ本格操業に至っていないことを喫緊の問題と捉え、プルトニウムバランス（余剰プルトニウム問題）や柔軟な核燃料サイクルの運営、再処理工場の早期竣工などを挙げる。
- 2) 世界的な情勢不安とエネルギー資源、サプライチェーンの不安を捉え、ウラン資源の有効活用やプルトニウム利用の促進に係るような捉え方で課題を挙げる、或いはテロ対策のような視点（余剰のプルトニウム等と関連付けて）核セキュリティ的視点から課題を挙げる。
- 3) 団塊世代の退職、若手技術者の不足などを捉え、人材確保や技術者の育成を課題として挙げる。
- 4) 少し、専門的な領域に踏み込み、再処理施設で課題の多いガラス固化などの個別技術を挙げ、白金族影響及びその対策、イエローフェーズ、遠隔保守に触れた課題について論述する。
- 5) 廃炉による廃棄物が大量に発生することや、最終処分場の立地が進んでいないことを捉え、どのように立地を進めるべきかなどの論理展開を試みる。或いは、福島対策の重要性を理由に、福島とそれ以外の区別や福島第一原子力発電所の事故により発生した廃棄物の扱い（オンサイト、オフサイト）の課題を挙げて述べる。
- 6) 最近の話題から能登半島地震などを踏まえ、耐震強化や新知見の取り込みなど、シビアアクシデント対策や自然災害対策の強化、安全性の向上などを課題として捉え、論述する。或いは防災の視点に触れて論述する。
- 7) 逆に高経年化などを問題として捉え、設備診断技術、高経年化対策の類で論述する。
- 8) 廃棄物の廃棄体化技術、技術的要件、基準の整備、放射性物質等の評価技術などを挙げる。

(3) については、抽出した最重要課題が解決した際に、課題の対策を事前に評価して、将来的な懸念事項とそれへの対策を示せるかどうかポイントとなる。課題解決による波及効果や重要度の変化などを含め答案を構成すると良いと考えられる。

これらの事項については、直近の試験問題で個別に出題されている事項を踏まえると、容易に抽出可能であろう。過去の問題を振り返り、キーワードを整理しておくで解答しやすい。一例として、令和 4 年度出題された、「核燃料取扱施設の廃止措置とそれに伴い発生する大量の放射性廃棄物処理・処分」に関するキーワードを整理する。

- (1) 再処理施設を対象とした場合の課題

- ① 再処理施設の構成材料は、耐硝酸性ステンレス鋼、Ti、Zr 合金等が用いられ、先行する原子炉の廃止措置と同じような除染係数(DF20～100)が得られるとは限らない。また、原子炉と比べると小口径配管、小型機器、塔槽類が多く系統除染しにくい。よって、複数回の除染、大量の除染液の使用が必要となる可能性があり、二次廃棄物の大量発生が懸念される。
- ② 再処理施設を解体する場合考慮すべき核種は¹³⁷Cs(半減期：約30年)や長半減期の α 核種であり、時間経過による放射能の減衰効果が小さく、施設閉鎖後の貯蔵期間による放射能低減が期待できないという問題点がある。
- ③ 放射性廃棄物の発生量の低減や処理・処分の観点では、運転期間中からの放射性物質による汚染や放射化による廃棄物量を詳細に特定し記録する必要がある。廃棄物を処分に適した形態に廃棄体化する場合、処分場の受入基準を想定しそれに合致するように廃棄体化方法を検討する必要がある。

(2) 最も重要と考える課題の選択及び複数の解決策

最も重要な課題として、①を対象とした。①を対象とした理由は、除染効果の不確実性及び二次廃棄物の増加は、解体作業に対する負担増、除染効果が小さかった場合には被ばく線量の増加に繋がるなど、複合的なリスクを抱えていると考えたためである。

解決策(1) 施設を構成する機器・配管を模擬し、シミュレーション等を行い適当な除染方法を決定する。

解決策(2) 除染溶液量の低減を指向するために除染溶液再利用を検討する。

解決策(3) 技術者の技量、習熟度を高めるために、IT 技術を活用したナレッジマネジメントやVR 技術を活用した事前訓練の充実化を図る。

(3) 新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策

確実な除染と解体作業が進むと、再処理施設からクリアランスレベル以下の廃棄物が大量に発生するが、クリアランス制度が効果的に運用されないと、これらの廃棄物が資源として十分に再利用が促進されないことが懸念されるため、クリアランス制度の理解促進などの対策が必要となる。

【参考情報】

- [1] 日本原子力学会和文論文誌、Vol. 12、No. 3 P. 197-210(2013) 芝原、白井ら 原子力施設の廃止措置における大型機器解体シナリオの最適化に関わる検討 プロジェクト管理データ評価システムの「ふげん」廃止措置への適用性の評価結果に基づく検討
- [2] 日本原子力学会誌、連載講座 21 世紀の原子力発電所廃止措置の技術動向 (全8回)
- [3] 日本原子力学会誌 連載講座 放射性廃棄物概論 施設の運転および廃止措置により発生する放射性廃棄物の対策 (全8回)
- [4] 技術士、30(4)、P8-11 堀口 VR 技術を応用した福島第一原子力発電所の廃止措置への挑戦

III-2 我が国は、世界に類を見ない急速なペースで高齢化が進んでいる。政府は、令和3年4月に高齢者雇用安定法を改正し、65歳までの雇用確保の義務化や70歳までの就業機会の確保の努力義務化といった雇用制度の整備を推し進めている。核燃料施設の運転等においても既存施設の設計・建設に従事し、施設の隅々まで熟知したベテラン技術者や施設の運転に長けたベテラン運転員が近年大量に定年退職を迎えつつある。その一方で、将来の原子力を担う若手の原子力人材の不足が大きな問題となっている。

このような状況を踏まえ、核燃料施設の運転等の管理の中核を担う技術者として、以下の問いに答えよ。

- (1) 上記の状況を鑑み、既存施設の安全な運転の確保を図り、安定的な運転を継続していくに当たって、技術者としての立場で多面的な観点から3つの課題を抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、これを最も重要とした理由を述べよ。その課題に対する複数の解決策を、専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示した解決策に関連して新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれぞれへの対策について、専門技術を踏まえた考えを示せ。

【解答のポイント】

問題文では、「ベテラン技術者の退職」と「若手の原子力人材の不足」を問題と捉えていることが分かるが、それを背景としつつ、自らの立場が「核燃料施設の運転等の管理の中核を担う技術者」として設定されていること、設問(1)で既存施設の安定な運転を前提(新規施設の設置等ではない)としていることに十分留意して答案構成を考える必要がある。

人材不足の課題に関し、大きく2つの方向性があると考えられる。すなわち、一つの方向性は、設備改良や自動化、標準化、メンテナンスフリー化等により、人による難しい判断や、労力を要する業務、作業を減らすことであり、もう一つは必要な対応を行える人材を育てることである。そして、それらの両者に共通して言えることは何ができれば良いか、どのような行為ができれば良いかとそのために必要なスキル、知識、経験

等の体系化である。

また、設問(2)において、専門技術用語を交えて示すことが要求されており、各受験生の業務経験に基づく具体的事例やその専門分野で用いられる用語を例として取り上げ、論述することを考慮して答案構成を行えばよい。

ここでは、設備改良、人材育成や技術継承を進めていく場合に、いくつか注意を要すると考えられる共通的事項について、数点を挙げておくので、参考にされたい。

1) 高経年化等に係る影響について～設計や設備の古さ、新しさへの配慮

古い設備と新しい設備のマッチングの問題。設備が老朽化してきた場合にあっては、処置のための期間、コスト、発生する放射性廃棄物などの関係から大規模な更新が難しい場合は少なくない。部分的な改良、更新を行う場合、ハード上の取合い、信号伝達その他、設計思想の時代による違いなどによって、思わぬエラー、不整合を生じる可能性を考えておく必要がある。単なる経験則に基づき、同じやり方でやれば良いなど、評価なしに継承した前例を踏襲したり、設備改造の際に思慮不足などがあると、思わぬトラブル、不具合を生じる可能性があることに留意したい。安全性向上対策、高経年化対策などを進める際には、特に考慮しておきたい事項になる。また、古い設計であるがゆえに不確実性を考慮して、柔軟な対応がとれるよう配慮されていることもあるので注意が必要である。

参考情報の ATENA の技術文書は発電所を対象としたものであるが、特に設備更新などを考える際には、同様の視点でプラントのリスク（高経年化、長期停止などを含む）を評価し、対策、改造の妥当性などを検討しておくべきであろう。（参考情報[1] [2] [3]）

2) 法的要求、技術基準の違い

JCO 事故、福島第一原子力発電所の事故を経験し、法制度、技術基準などが見直されてきている。新規規制基準においては、自然災害対策、重大事故対策に関し、大幅に法的要求が追加されたほか、新検査制度の導入により事業者の一義的責任を明確にし、事業者の保安活動に関する規制当局の関与の仕方が見直されている。技術継承を進める場合において、過去の技術をそのまま適用して法的要求を満足できるとは限らないということを念頭においておく必要がある。

3) 既存技術と革新技術の融合

省力化、自動化により業務の効率化を図ろうとするケースにおいては、技術の進歩が著しい IoT 技術、AI 技術の応用、導入などを考えることになるであろう。しかしながら、施設の設計・建設に係る経験や施設の隅々までを知ったベテラン運転員であっても、こうした技術に長けた人材があるとは限らない。むしろ、若手技術者の方が馴染みのある者も多いであろう。今後の運転の中核となる技術者には、こうした世代間の橋渡し、技術の融合に関して、重要な役割を担っているものと考えられる。

そのためには、既存技術に関しては熟練技術者の技術の要点を文書化、咀嚼することや、現場設備の取扱いに係るスキルを伝授するためのツール、カリキュラムの整備、デジタル化のインプットとなる情報や対象とするデータの洗い出し、整理など対応すべき課題は多い。

また、原子炉については、革新的原子炉の検討が進められており、将来的には、こうした革新的原子炉に対応する形で核燃料施設の改造等を行うことも念頭においておく必要があるだろう。

4) システマチックな人材育成アプローチ

1980 年代に米国原子力発電運転協会（INPO）で開発された SAT（Systematic approach to training）がある。この取組みは、

- ① 分析：業務、訓練ニーズの分析、習得すべき力量を定義
- ② 設計：必要な力量を習得する訓練プログラム設計
- ③ 開発：訓練資料等の開発
- ④ 実施：力量を向上させる訓練の実施、試験
- ⑤ 評価：目的の力量を習得したか、訓練効果を評価

の 5 つの段階からなっている。現場で求める力量やその習得状況が見える化し、職種、職層に求められる力量をシステマチックに身に付ける取組みが行われている。中途採用、原子力以外を専門分野とする技術者の登用など、働き方が多様化する中で、こうしたプログラムの充実を図ることや、基本的事項をいち早く習得し、短期間で即戦力となるための運用など、担当となる現場に応じた人材育成を考える上で念頭に置いておきたいアプローチ、システムである。

5) 運転経験、事故・トラブルからの教訓と風化の防止

既存施設の安全な運転の確保を図る上では、単に運転操作をマニュアル（操作手順）通りに行えるというのみでは不十分である。国内の核燃料施設にあっては、JCO 臨界事故やアスファルト固化処理施設の火災爆発事故の教訓は風化させてはならない。運転等の中核を担うものとしては、組織がそうした過ちを犯さないよう技術者倫理の意識を高く持つ必要がある。前者は安全に関する知識不足、組織的な不正、裏マニュアルの存在がある。更に、後者においては、温度計が故障した状態で運転を行っていたこと、運転パラメータの変更にあたり、十分な安全上の審査が行えていなかったこと、必要な消火時間に関する情報が技術継承されなかったことなど、教訓として捉えておくべき事項をいくつか挙げることができる。

もっと言えば、核燃料施設ではないが、福島第一原子力発電所の事故に見られるように、自ら安全性を向上させる姿勢が足りなかったことや、自然災害への畏怖、結果としてシビアアクシデント時の対策が不十分になってしまったことなど、原子力に携わる者として深く胸に刻んでおく必要がある。

また、PRA、HAZOP、FTA、FMEAのような安全解析（対策実施を含む）を行っている場合、プラントの弱点として知っておくことが重要である。併せて、通常と異なる変化（通常とそうでない状態）の検知や見極め方、故障や誤操作により生じると考えられる変化や対処方法など、深層防護の観点から運転技術を習得させるよう留意しておく必要がある。

6) 廃止措置、バックエンドへの配慮

規制当局がIAEAによるレビューを受けた際に、指摘された事項の一貫で、プラントが未だ操業中であっても廃止措置方針を策定し提出することになっている。原子炉施設の廃止措置が本格化しつつあるが、核燃料施設においても廃止措置段階に移行した場合に発生する廃棄物の取扱いなど、バックエンド対策を念頭においておく必要がある。クリアランス制度、NR（放射性でない廃棄物）制度の適用、運用などを念頭において、使用履歴、汚染履歴などの必要なデータの取得、メンテナンスフリー化による廃棄物の低減化、放射性物質による汚染、線量率を低く抑えるようなプラント運営に努めなければならないことなど、配慮が必要な事項がある。

さらに、設問(3)において、「新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれぞれへの対策」とあるので、設問(2)の課題を解決した後に、その波及効果を評価し、将来的な懸念事項として、信頼性、安全性、法整備、社会的理解などを挙げることで、または、重要度の高い課題を解決した後、その段階での結果を再評価し、顕在化してくる新たな課題を懸念事項として挙げるのが考えられる。これらの懸念事項とその対策を論述することを考慮して、答案構成を行えばよい。

【参考情報】

- [1] 設計の経年化評価ガイドライン、原子力エネルギー協議会、2020年9月
- [2] プラントの長期停止期間中の保全ガイドライン、原子力エネルギー協議会、2020年9月
- [3] 製造中止品管理ガイドライン、原子力エネルギー協議会、2020年9月
- [4] 産業界における人材育成の現状と課題について_1. 東京電力HDにおける人材育成の取組み、松澤泰弘、日本原子力学会誌 Vol. 65、No.12 (2023)
- [5] アスファルト固化処理施設火災爆発事故の原因究明結果について（技術報告）、小山智造ほか、JNC-TN8410-99-027
- [6] 原子力委員会資料「IV事故の背景についての考察」<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo99/siryo78/siryo116a.htm>

【類似問題】

- ・R1年度（2019年度）必須問題Ⅰ-1

6.3 「放射線防護及び利用」の問題と解答のポイント

Ⅲ 次の2問題(Ⅲ-1、Ⅲ-2)のうち1問題を選び解答せよ。(赤色の答案用紙に解答問題番号を明記し、答案用紙3枚を用いてまとめよ。)

Ⅲ-1 原子力事故などで環境中に放出される放射性核種について、健康や環境への影響で主に問題となるものは、ストロンチウム 90、ヨウ素 131、セシウム 134、セシウム 137 などである。特に、ヨウ素 131 は半減期が短いため、事故発生から時間が経過した後では被ばく影響の推定が難しい放射性核種となっている。また、ヨウ素は揮発性が高いため、原子力事故などで環境に多く放出される元素である。そのため、ヨウ素 131 については万一の原子力事故の発生に備えた放射線防護の事前の対策方針の立案と事故後の環境放射線モニタリングが極めて重要となる。このような状況を踏まえて、原子力事故を想定したヨウ素 131 の放射線防護対策と被ばく線量の推定を計画・実施するに当たり、以下の問いに答えよ。

- (1) 放射線防護の技術者として多面的な観点から3つ課題を抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、これを最も重要とした理由を述べよ。その課題に対する複数の解決策を、専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示した解決策に関連して新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策について、専門技術を踏まえた考えを示せ。

【解答のポイント】

(解答作成の方針) ヨウ素 131 は甲状腺被ばくに寄与する放射性ヨウ素の中でも特に半減期が短いため、事故直後から継続して測定・モニタリングする必要がある。モニタリングの結果に基づき、住民の退避やその後の被ばく者の長期的なモニタリング等課題が多岐にわたるため、それらを整理して記述する必要がある。以下に解答例を示す。

- (1) ヨウ素 131 の防護とモニタリングに関する3つの課題

A. 放射線量の正確な測定とモニタリングの課題：

観点：放射線の影響を最小限に抑えるためには、複数箇所での継続的なモニタリングの継続が必要。

内容：ヨウ素 131 の高い揮発性と短い半減期により、事後の追跡には限界がある。施設から放出されるヨウ素濃度の時間変化を複数箇所でも継続的に測定・記録することが重要であり、異なる立地、環境条件、機器で収集されたデータの相互比較も重要である。

B. 事前の放射線防護上の対策と退避計画に関する課題：

観点：住民の被ばくリスクの最小化のために事故発生前に放射線防護対策を計画する重要性

内容：ヨウ素 131 の高い揮発性と拡散性を考慮し、事前に放射線防護上の対策と退避計画等が必要となる。自治体やリスクコミュニケーションの専門家と協力し、計画を作成し、定期的に訓練を実施する必要がある。

C. 長期的な被ばく影響の評価の課題：

観点：ヨウ素 131 は半減期が短いため、事故後の被ばく影響の評価が難しい。

内容：短半減期の核種の場合、被ばく線量の急速な減少により、事故後の影響の評価が複雑化する。被ばく者の長期的なモニタリングや、生態系への影響評価など、長期的かつ包括的な研究が必要である。

- (2) 重要と考える課題と複数の解決策

重要課題として、A「放射線量の正確な測定とモニタリングの課題」を挙げる。その理由は、単独ではなく複数の測定点におけるリアルタイムかつ正確な放射線データの取得が、被ばくリスクの評価と住民の放射線防護対策の観点から極めて重要と考えるからである。それらのデータが不足した場合、避難指示や被ばくリスクの評価が不確かとなる恐れがある。以下ではモニタリングの課題に関する解決策を2つ挙げる。

A-1 継続モニタリングシステムの構築：

自動制御およびデータ転送機能を備えたリアルタイムモニタリングシステムの導入を行う。具体的には平常時から連続して空气中放射性物質のサンプリングと計測を行い、モニタリングステーション等のセンサーデータを遠隔地に伝送するシステムを構築する。ステーションの構成機器には多重化が必要である。例えば電源は商用電源だけでなく、バッテリー、非常用発電による多重化、伝送システムは専用線、有線インターネット、4G 通信網、LoRa (数km伝送可能な LPWA 通信) 等で多重化を考慮する。

A-2 遠隔操作可能なモニタリングカー等の利用：

モニタリングステーション自体の継続運用が困難になるほど被災した場合や、住民の避難場所近傍で的確にモニタリングするためには自動運転やロボット技術を使用した遠隔操縦機器の導入を検討する必要がある。具体的には自動運転機能や遠隔操作機能を有するモニタリングカー等を導入することで、測定作業者の被ばくリスクを最小限に抑えながら継続的なデータ収集が可能となる。

(3) 将来的な懸念事項とその対策

上述のA-2を導入するにあたり、懸念事項と対策を2つ挙げる。

懸念1：技術的信頼性と安全性の確保に関する懸念

自動運転や遠隔操作機能を備えたモニタリング機器の技術的信頼性と安全性が確保されているかどうかが不確定。

対策1：技術的な検証や評価を徹底し、国際的な基準や認証を導入して信頼性を確保する。（平常時とは異なる）非常事態発生時に意思決定するための組織や基準を策定し、事前に綿密なトレーニングを受けた運用者を配置する。

懸念2：遠隔自動運転の法整備と社会的理解に関する懸念：

測定作業者の被ばくリスクを最小限に抑えるためにはレベル4～5の自動運転を備えたモニタリングカーが望ましいが、現状はそれらの技術と法整備に加え、社会的な理解が追いついていない。

対策2：産・官（・学）の連携により自動運転のレベルを向上に取り組み、公道でのレベル4の自動運転が普及した段階において、自動運転機能を備えた遠隔モニタリングに関する適切な法的フレームワークを整備や社会的・倫理的な理解促進の活動を実施する。

【参考文献】

[1] 「大気モニタ及びヨウ素サンプラの整備」、新潟県

<https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/317118.pdf>

[2] 「CsI 検出器及び LPWA を活用した 環境放射線モニタリング機器の実現可能性調査」 令和 4 年度 原子力規制庁 放射性物質測定調査委託費 研究報告書 京都大学

<https://www.nra.go.jp/data/000447919.pdf>

[3] 「自動運転のレベル分けについて」国土交通省

<https://www.mlit.go.jp/common/001226541.pdf>

III-2 放射光や中間子等の電磁波や粒子線を含めて、広い意味での放射線を用いた分析結果の報道が増えてきている。宇宙・地球科学、歴史学、法科学（犯罪の捜査や立証に関連する科学）等で、学術的又は社会的な価値が高いと思料される物があり、その所有者から、放射線を利用した物質・材料の分析施設の受入責任者であるあなたに科学的知見を得るための相談があったと想定して、以下の問いに答えよ。

- (1) 放射線を用いた分析を行うに当たり、放射線利用の技術者としての多面的な観点から3つ課題を抽出し、それぞれの観点を明記したうえで、その課題の内容を示せ。
- (2) 前問(1)で抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、これを最も重要とした理由を述べよ。その課題に対する複数の解決策を、専門技術用語を交えて示せ。
- (3) 前問(2)で示した解決策に関連して新たに浮かび上がってくる将来的な懸念事項とそれへの対策について、専門技術を踏まえた考えを示せ。

【解答のポイント】

(1) 放射線を用いた分析を行うに当たり課題として考えられること

課題については、知識や業務経験などによっていろいろな切り口が考えられるが、ここでは、分析したい物質、分析対象の大きさ、分析したい場所をあげる。

① 分析したい物質

分析したい物質の分子や原子に応じて、放射線の種類やそのエネルギーを選択する必要があり、放射線のエネルギーとその強度が決まれば放射線源の選択が可能となる。まず、放射光、中性子、ミュオンを用いた分析について簡単に説明する。

(ア) 放射光

放射光は、高エネルギーの電子等の荷電粒子が磁場中でローレンツ力により曲げられるときに放射される電磁波である。高強度の連続スペクトルを持った光が高い指向性を持って放射されるため、分光器などにより特定の波長の光を選択的に使える利点がある。以下に放射光を用いた分析手法としていくつか挙げる。

- XAFS (X線吸収微細構造) - 原子（元素）のまわりの構造がわかる。自動車用排ガス浄化触媒などの触媒材料の開発や生体中

の微量元素の構造分析などに応用されている。

- 蛍光X線分析 - 試料の元素分析。材料科学、環境科学、医学、生物学、考古学、科学鑑定などへ応用。
- 光電子分光 - 光照射によって放出される光電子をエネルギー分析することで、物質の表面や内部の電子状態を調べる手法。先端材料やデバイス開発などに応用されている。
- 光電子顕微鏡 - 光電子分光法と顕微観察手法を融合させた空間分解能を有する分光手法。
- X線吸収分光法 - X線の吸収を観測することによって、物質の電子状態、特に非占有軌道の情報を得る手法。
- X線発光分光法 - X線の照射によって引き起こされるX線領域の発光を分光することで物質の電子状態を調べる手法。光を観測する手法であるため、測定試料の制約がなく、帯電してしまう試料や液体などの測定も可能。
- X線回折 - 結晶構造の情報から、地球内部のマグマやタンパク質の構造などがわかる。新薬開発に応用が期待されている。
- X線小角散乱 - 数ナノメートルレベルでの規則構造の分析などに用いられている。蛋白質の溶液内の構造、液体構造、微粒子、液晶、合金の構造などの研究に利用されている。

(イ) 中性子

原子核を構成する粒子のうち、無電荷の粒子のことで、主に水分子の水素原子などの軽元素に高い感度を持っている。中性子源としては放射性同位体による自発核分裂中性子を用いるもの、原子炉を用いるもの、加速器により発生させる方法などがある。中性子回折法とは、結晶による中性子線の回折現象を利用して、物質の結晶構造や磁気構造の解析を行う手法である。中性子イメージングは非破壊検査の一種で、中性子線を検査対象に照射して内部を透過させて材料背後にある写真用フィルムや蛍光板やフラットパネルディテクターで撮影することにより、内部の欠陥や構造を調べる手法である。

(ウ) ミュオン

ミュオンは、主に加速器で発生させたミュオンが利用されており、素粒子・原子核物理学から物性物理学、物理化学の研究に至るまで幅広く利用されている。

また、宇宙から降り注ぐミュオンを利用して、火山のマグマ、溶鉱炉、ギザの大ピラミッド等のピラミッドの内部構造や福島第一原子力発電所の炉心の現状を調査するためにも使用された。

② 分析対象の大きさ

分析対象の大きさによって、必要とされる照射野によって実験装置の選択が必要となる。また、透過型で分析を行う場合、対象が厚さによっては大強度の量子ビームが必要となり、そのための放射線源を選択する必要がある。

③ 分析したい場所

分析したい対象が小さく、実験室に持ち込んで分析できる場合は問題ないが、大きな構造物などの分析を行いたい場合には、放射線源を被測定物の場所まで移動させて分析する必要がある。

(2) 最も重要と考える課題

考えなければいけない課題として、知識や経験に基づいて選択するのが良いと考えるが、以下に放射線源、検出器、分析したい場所についての課題について挙げる。

① 放射線源

分析方法によって放射線源を選択する必要があるが、放射線のエネルギーや強度によっては放射線源の開発から行う必要がある。

分析対象の大きさによっては大きな照射野が必要となり、その場合は量子ビームを均一に広げる方法の開発が必要となると考えられる。

放射線源として小さくさまざまな加速器が用いられることが多いが、特殊な放射線源が必要な場合には加速器の開発から行われることが多い。

② 検出方法

検出したい放射線の種類、必要なエネルギー分解能、検出面積、飛跡情報が必要か、時間情報が必要かなど、検出方法によっては検出器の開発から行う必要があり、取得したデータ量によっては解析方法についての検討も必要である。

③ 分析したい場所

例えば、中性子を用いてインフラ構造物の非破壊検査を行いたい場合、現場まで移動できる小型中性子源が必要となる。この解決策として、トラックなどの車両に積み込んで移動して利用することが考えられ、そのための小型の可搬型加速器を用いた中性子源の開発が必要となる。

インフラ構造物の非破壊検査の場合は屋外で 사용되는こともあり、大強度の量子ビームを使うことが難しい。このため、高感度の検出器と併せて使うなど、検出方法の検討も必要である。

(3) 将来的な懸念事項とそれへの対策

設問（2）で挙げた課題への懸念事項と対策となるため、解答者によっていろいろな切り口が考えられると思われるが、いくつか挙げる。

- ・放射線源や検出方法が特殊になると分析を行う側にも専門的な知見が求められ、分析結果の解釈も簡単ではないと思われる。分析施設側にも実験をサポートするスタッフを配置するなどの対策が必要となる。
- ・大強度の放射線源が必要となった場合、一般的には大型の加速器施設が必要となり、建設コストや維持コストが問題となる。多目的に分析できるような複合施設とするなど、コストを意識した施設にすることが求められる。
- ・インフラ構造物の非破壊検査の場合は屋外で 사용되는こともあり、放射線被ばくの管理上の問題も発生すると考えられる。被ばくのリスクや放射化の量の低減を図るために、十分に低い線量でも検出できる検出方法を検討するなどの対策が必要である。

【参考】

<https://ja.wikipedia.org/wiki/放射光>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/中性子回折法>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/中性子イメージング>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/ミュー粒子>

7. おわりに

今年度の問題でも取り上げられていたが、最近、加速器や放射線を利用した新発見や新材料開発などが報道、インターネット等を通じて公表され、広く知れ渡ってきている。また、AIに関する報道もしかりである。一方で、線状降水帯による豪雨災害、能登半島地震のように自然災害が猛威を振るっており、防災対策を充実させる必要性が認識され、リスク回避、安全対策に関する要求レベルも高くなってきている。カーボンニュートラルへの対応、ウクライナ情勢などグローバルに考えて対策を講じる必要性も高まってきていると感じている。原子力・放射線分野の技術は、これらに少なからず寄与し、社会貢献につなげることが技術者、技術士としての責務であろう。

古い技術は陳腐化する。自らの専門技術も技術の高度化、統合化等に伴い、up-date していかなければならない。これから技術士資格の取得を目指される方々には、その意識の高さに敬意を表すると共に、ぜひ資格を取得頂き、活躍されることを祈念している。

本解説の冒頭に、試験問題の傾向や、技術士に求められる資質能力に言及している。特に、技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）として「専門的学識」「問題解決」「マネジメント」「評価」「コミュニケーション」「リーダーシップ」「技術者倫理」に関する内容をよく理解されるよう勉強、スキルアップに努めて頂くことをお願いする。試験に合格するためには、自らの経験や考えを文書化して表現するスキルももちろん必要になるが、課題の捉え方、複数の解決手段を考えてみる、制約事項や重視する事項、解決手段の比較評価、相手の立場で考えるというようなことが、合格に近づくための第一歩になると感じている。

各設問を見ても分かると思うが、出題されている事項は、技術士への期待の表れである。必然的に、現時点で課題とされるものであるから、現状の動向や資料を調べそれを記述するのみでは、何ら解決に向けた提案が出来ている状態ではないので、十分に資質能力を示すことにはならないのである。

既に技術士資格を取得されている方にあつては、十分承知されていることとは思いますが、技術士の資質能力の中に継続研さんがある。技術士の方にあつては、自らの研さんとして、関連する専門知識の体系的整理や学び直し、修習技術者の指導などに活用していただければと考えている。常に最新の技術を学び、社会と向き合い、高い倫理感（技術者倫理）を持って対応すること、それぞれが直面している技術的課題の克服や革新的技術開発、研究を通じて、社会貢献を果たしてほしい。

本資料が活用され、多くの技術士の輩出と活躍につながることを期待している。

謝辞

本講座のまとめにあたり、以下の方々をはじめとする多くの技術士、研究者、技術者に原稿案の執筆、レビューなど無償で協力を頂いた。各位のご協力に心より感謝する。（敬称略）

〔協力頂いた方々〕

（技術士）澤崎浩昌、吉村一夫、高嶋秀樹、坪田陽一、岡本成利、広田憲亮、菊澤信宏、梅澤克洋、山中淳至、川田学

（その他、関連企業・機関等の技術者、研究者の方々）永津弘太郎、市瀬潤、堀口賢一、細見健二、小池優子

一般社団法人 日本原子力学会 教育委員会 技術者教育小委員会委員長 芳中 一行

〔技術士試験対策ワーキンググループ員〕

芳中 一行、堀口賢一、大沢竜也、高橋優也、松浦正義、溝口真樹、本田一明、岡田融

〔技術者教育小委員会委員〕

芳中 一行、高田英治、吉田拓真、金川悦子、岡田融、湯口康弘、松澤泰弘、中田よしみ