

令和3年度技術士試験「原子力・放射線部門」対策講座

令和2年度技術士二次試験「原子力・放射線部門」

—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—

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

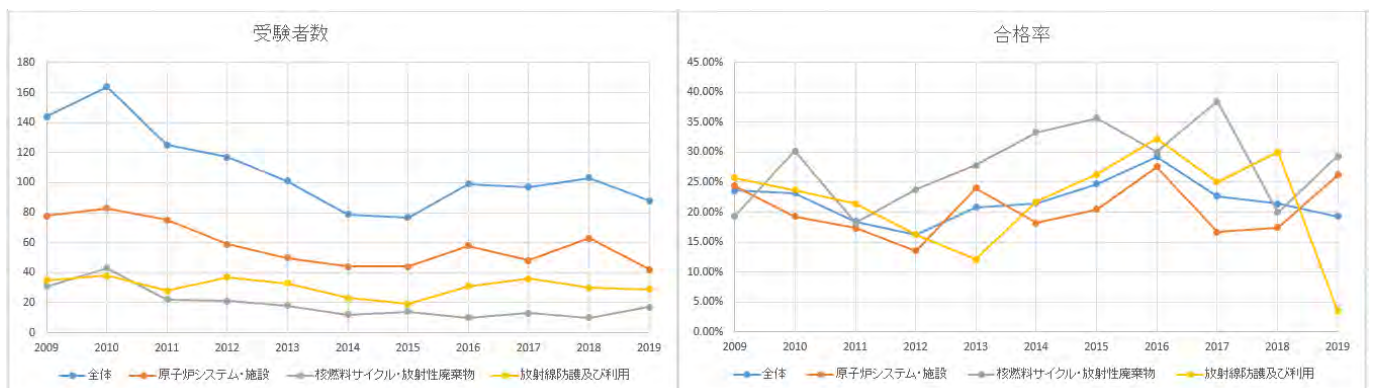
令和2年9月22日(火)、技術士第二次試験「原子力・放射線部門」の筆記試験が実施された。平成16年に本部門が新設されてから17回目を数える。統計的には、過去10年の平均で105人が受験し、合格率は21.75%である。

一昨年度(令和元年度)の二次試験から試験方法が大きく変わった。一般20部門共通の変更として、必須科目が択一式から記述式に変更された。また、技術士に求められる資質能力としてコンピテンシーに係わる項目が各設問の中で問われる様になった。コンピテンシーと各設問の関係は参考資料[1]および昨年度の本講座「令和2(2020)年度技術士試験「原子力・放射線部門」対策講座(第二次試験)」に詳しく記載されているので参照されたい。一方、原子力・放射線部門では、選択科目が5科目から3科目に再編された。「原子炉システムの設計及び建設」と「原子炉システムの運転及び保守」が「原子炉システム・施設」に、「放射線利用」と「放射線防護」が「放射線防護及び利用」に統合され、「核燃料サイクルの技術」が「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」に変更された。

試験方法が変更されたが、令和元年度の一般20部門全体の合格者数は平成30年度より183名(合格率にして1.5%)増えている。ただし、原子力・放射線部門では5名(2.1%)減っている。「原子炉システム・施設」の合格者数は変わらず、「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」では若干上がったが、「放射線防護及び利用」では8名(26.6%)減少した。「放射線防護及び利用」では試験方法の変更と選択科目の再編による相乗的な影響があったと推測されるものの、少なくとも、試験方法の変更で難易度が増した訳ではなさそうである。従って、受験者は技術士試験が難しくなったのではないかと過度に心配する必要は無いが、受験に当たっては、対策としては専門領域を満遍なく掌握する必要が出てきており、さらに、各設問で問われているコンピテンシーの項目を意識して解答を記述することを心掛けて頂きたい。

技術士試験でコンピテンシーが重要視されるようになった背景には、昨年度の本講座に記載されている通り、科学技術・学術審議会技術士分科会の「今後の技術士制度の在り方」^[2]における議論の結果がある。グローバル化に対応するため、APEC エンジニアやIPEA 国際エンジニアの資格基準と整合を図っており、有能さ(コンピテンシー)の証として技術士資格が広く活用頂きたい。経済団体連合会会長であった土光敏夫氏の日本技術士会「技術士要覧」(1981年)巻頭言にあるように、「学理を開発した学者には博士という称号が与えられる。これに対して、技術を産業界に応用する能力を有すると認められた技術者には技術士という称号が与えられる。」のである。

技術が高度化・複雑化し、膨大な量の情報が氾濫する現代社会において、高い技術力を有するとともに高い倫理観をもつ技術者を確保することが組織にとって重要となって来ている。技術士法では「信用失墜行為の禁止」の義務および「公益確保」の責務が規定されている。そのことは、コンプライアンス問題を防止するよりどころとなるはずである。本講座が技術士資格を有する人が1人でも増えることに貢献できることを願う。再び土光氏曰く、「技術社会の倫理を確立し、わが国産業界の発展に寄与することを望んでやまない。」のである。



2. 第二次試験の試験要領

第二次試験の試験要領は、日本技術士会ホームページの『令和3年度 技術士第二次試験の実施について』とそこに添付されている「令和3年度 技術士第二次試験大綱」に記載されているので確認頂きたい。以下はその抜粋である。

(1) 筆記試験

- ① 必須科目および選択科目は、いずれも記述式により行う。
- ② 筆記試験の問題の種類および解答時間は、次のとおりとする。

問題の種類	解答時間	配点	合否決定基準
I 必須科目 「技術部門」全般にわたる専門知識、応用能力、問題解決能力および課題遂行能力に関するもの	2時間	40点満点	60%以上の得点
II 選択科目 「選択科目」についての専門知識および応用能力に関するもの	3時間30分	60点満点	60%以上の得点
III 選択科目 「選択科目」についての問題解決能力および課題遂行能力に関するもの			

(2) 口頭試験

- ① 口頭試験は、筆記試験の合格者に対してのみ行う。
- ② 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およ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に留意する。
- ③ 試問事項および試問時間は、次のとおりとする。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に留意する。

試問事項	試問時間	配点	合否決定基準	
I 技術士としての実務能力	20分	1. コミュニケーション、リーダーシップ	30点満点	60%以上の得点
II 技術士としての適格性		2. 評価、マネジメント	30点満点	60%以上の得点
		3. 技術者倫理	20点満点	60%以上の得点
		4. 継続研さん	20点満点	60%以上の得点

3. 第二次試験での出題傾向とポイント

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」^[1]に出題内容等についての記載があり参考になると考えられるので再掲する。実際に答案に書くかは別として、それぞれの設問の評価項目に含まれているコンピテンシーのキーワード(専門的学識を除く)を入れて答案を構想する練習をして置くが良い。

出題傾向を調べるために、平成25(2013)年度以降の出題項目を必須科目I、選択科目毎の選択科目IIおよび選択科目IIIについて表にまとめた。類似項目には独断的に色を付けたので、印刷時にはカラー印刷として参考にして貰いたい。

(1) 必須科目 I

2018年以前の必須科目は択一式で、20問出題される中から15問解答し、合格基準は正解解答60%以上(15問中9問以上)であった。そのため、得意な問題は回避することが出来た。2019年以降は記述式となり、2問から1問を選んで解答するので、運悪く2問とも得意な問題である可能性が多少なりとも高くなった。ただし、60%以上の得点であることには変わりがないので、作文力で得意な問題でも60%の得点を得られる様に工夫する余地ができたとも言える。2019年、2020年とも問題のパターンは同じで、設問事項の説明の後に、(1)課題抽出、(2)解決策、(3)リスクと対策、(4)必要要件と留意点と続く。従って、このパターンで自分の考えをまとめる練習をしておくが良い。特に、出題数が減ったので、選択科目による差が生じない様に、より一般的な事項が取り上げられる可能性が高い。日頃から、新聞やニュース等で報道される様な原子力関連事項について作文の練習をしておくことを推奨する。「平成31(2019)年度 技術士試験の概要について」に記載されている出題内容は下記である。

～「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

必須科目が記述式に変更されてから第2次試験はまだ2回しか実施されていないが、傾向分析として2年分の出題内容を比較した。選択科目とあまり関連性のない事項と廃棄物に関わる問題との組合せであることには変わりがない。一般性の高い項目と、原子力産業界における重要課題から出題されている。「汚染土壌を含む廃棄物管理」に関する設問は「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」及び「核燃料サイクルの技術」の選択科目問題として、2015年、2017年、2019年に「放射線防護」の選択問題として、2016年と2018年にも出題されている。多くの原子力発電所が停止している現時点では、建設や運転よりも廃止措置や廃棄物管理の重要度が高いのは理解できる。設問Iは、社会的に注目度が高く一般的かつ重要な問題が出題されており、技術士であれば専門性に依らず当然解答できることが求められる内容となっている。一方、人材確保やリスクコミュニケーションは、最近の講演やシンポジウムで良く聞くテーマである。新型コロナの感染拡大のためにイベント自体が減っており、対面型の講義へ参加出来る機会も減っているが、近年、Web開催を活用したイベントが増え、居住地域に関係なく各種イベントに参加出来る機会も増えてきており、原子力学会が主催、共催あるいは協賛するイベントや学会誌に掲載されているテーマを調べておくに役立つ。技術士法第2条に規定される3義務2責務、“信・秘・公・名・資（しんぴこうめいし）”の一つである“資質向上”の実践が設問において試されていると感じる。医療分野など原子力分野以外から受験する人にとっては必須科目Iが難問に感じられるかも知れない。令和元年度版 原子力白書³⁾は可能な限り、また、参考資料[4]も2019年の出版で、福島事故後の原子力の課題がまとめられているので出来るだけ読んで置くが良い。

～必須科目I～

設問	R1/2019	R2/2020
I-1	技術継承と人材確保	福島事故の汚染土壌を含む廃棄物管理
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

(2) 選択科目II

いずれの選択科目においてもII-1では4設問から1つを選んで解答が求められており、問われ方も「～について述べよ」など単一の設問が多い。従って、II-1では専ら専門的学識が問われている。一方、II-2では2設問から1つを選んで解答が求められており、設問の説明の後に、(1) 調査・検討すべき事項、(2) 留意すべき点・工夫、(3) 関係者との調整策が問われている。II-2では専門的学識に加えて、コンピテンシーのうち、マネジメント、コミュニケーション、リーダーシップを意識して解答する必要がある。また、必須科目Iと同様に、個々の技術的課題については選択科目II-2の設問パターンで作文する練習をしておくが良い。「平成31(2019)年度 技術士試験の概要について」に記載されている出題内容は下記である。

～(1)「選択科目」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

～(2)「選択科目」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業務遂行手順が説明でき、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、マネジメント、コミュニケーション、リーダーシップの各項目

それぞれの選択科目で過去に類似の問題が出題された割合を見てみると、令和2年度は、「原子炉システム・施設」と「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」では6問中2問、「放射線防護及び利用」では6問中4問だった。ちなみに、令和元年度は、「原子炉システム・施設」で6問中5問、「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」で6問中6問、「放射線防護及び利用」で6問中4問だった。「原子炉システム・施設」と「核燃料サイクル術及び放射性廃棄物の処理・処分」では再出の割合が下がっているが、「放射線防護及び利用」では変わっていない。いずれにしても過去の問題と類似の問題が一定程度出題されているので、過去問⁵⁾は確認しておいた方がよい。令和2年度の新規の出題は、「原子炉システム・施設」では新規基準に関する内容が目立つ。「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」および「放射線防護及び利用」では、それぞれの分野で長年の懸案となっている事項が繰り返し出題されている。日頃から選択科目における懸案事項について自らの考えをまとめておくとうい。

～「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	H25/2013	H26/2014	H27/2015	H28/2016	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020
II-1-1	原子炉施設の設計の多重性、多様性、独立性	各事象における安全評価上の判断基準	MI-2, チェルノブイリ, 1Fにおける事故	燃料要素の許容損傷限界	炉心設計における核、熱、機械的制限事項	原子炉制御室	原子力災害対策特別措置法	原子力発電所の安全目標
	軽水炉「運転時の異常な過渡変化」の判断基準	新規基準の重大事故	事故時等の運転操作手順	「運転上の制限」(LO)と、LO逸脱時とすべき措置	実用発電用原子炉の運転管理に関する保安規定	倍化時間と添加反応度の関係		
II-1-2	最終ヒートシンク	安全重要度分類「クラス」設備	原子炉格納容器のバウンダリー	高温ガス炉のシステム上及び安全上の特徴	原子炉構成材料の選定	軽水炉以外の原子炉の冷却材	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
	主要制御系の目的、機能	原子力災害特別措置法	特定重大事故対処設備	軽水炉の出力変動	臨界近接の手法の原理	使用済核燃料の保管・貯蔵		
II-1-3	運転状態 I, II, III, IV及び試験状態	原子炉冷却材圧力バウンダリー	深層防護の基本的考え方	熱中性子炉の温度による主要な反応度変化	安全保護回路の要件	高燃焼度化	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
	軽水炉の炉心設計での可燃性毒物使用	決定論的安全評価と確率論的安全評価	異常発生時の緊急活動レベル(EAL)の改正	「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」制度	PWR/BWRの一次冷却水の水化学管理	廃止措置計画の申請に当たり必要な説明書		
II-1-4	高レベル放射性廃棄物の長寿命核種の核変換処理	高速中性子炉の原子炉冷却材	反応度制御システム及び原子炉停止システム	軽水炉の発電原価への1F事故の影響	ナトリウム冷却高速炉の安全上、システム上の特徴	フィルタベント装置	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
	最終ヒートシンク確保、使用済燃料貯蔵プール冷却、遮へい、未臨界確保対策	原子力損害の賠償に関する法律	燃料交換中における未臨界性の担保方策	原子炉起動時の中性子源の目的、種類、振る舞い	実用発電用原子炉の運転期間延長認可	国際原子力・放射線事象評価尺度(INES)		
II-2-1	1F事故を受けた電源設備の安全強化の計画	1F事故を受けた残留熱除去系設備の設計変更	発電用原子炉施設における火災防護設計	受動的(静的)安全システムの設計	新設プラント計画時の被ばく低減計画	内部溢水評価の手順	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
	高経年化対策を考慮した保守計画	長期間停止中の原子力発電プラントの保全	原子力発電プラントの確率論的リスク評価(PRA)	人的過誤によるトラブル防止・低減	既設原子炉施設の再稼働のための設置許可変更	重大事故等対処設備の工事計画		
II-2-2	設計で適用するシミュレーション解析	デザインレビュー計画	重大事故対処設備の設置	外的事象対策の設計	1F事故の教訓を踏まえた電源喪失に対する耐性向上	使用済燃料貯蔵槽からの放射性物質放出防止・緩和	廃止措置実施方針	是正処置プログラムCAP
	営業運転開始後に必要な諸手続き	新規基準の骨子	プラント長期停止における技量の維持計画	重大事故等対処設備や多様性拡張設備他の保守管理	事業者の自主的な安全向上における外部レビュー	状態監視保全方式の導入手順		

～「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	H25/2013	H26/2014	H27/2015	H28/2016	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020
II-1-1	我が国のウラン資源確保	商業規模使用のウラン濃縮方法	核燃料サイクル施設におけるテロ対策	ウラン採鉱から燃料になるまでの工程	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
II-1-2	核燃料サイクル施設における保障措置	再処理施設で過去に発生した事故事例	核燃料サイクル施設における核不拡散留意事項	使用済燃料の中間貯蔵施設での貯蔵	MOX燃料製造施設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
II-1-3	国内外での過去の再処理実施例	高レベル放射性廃棄物の最終処分プログラム	高速炉や加速器を用いた長寿命放射性核種の核変換	低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分	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
II-1-4	我が国のクリアランス制度	我が国の、軽水炉でのプルスーマル推進の意義	プルスーマル実施における課題と内容	核兵器不拡散条約に関するIAEA-日本の追加議定書	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
II-2-1	核燃料サイクル施設の保守計画	原子力施設の既存製品改良	事故に伴う放射性廃棄物の中間貯蔵施設	放射性廃棄物の減容処理実証試験	現地試験で要求性能未達となったトラブル対応	IF事故の燃料デブリ一時保管施設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
II-2-2	核燃料サイクル施設への新規海外技術導入	燃料加工施設、再処理施設の重大事故防護計画	使用済燃料の直接処分の有効性	高レベル放射性廃棄物の冷却機能喪失	IF事故のより汚染された廃棄物の埋設処分施設	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

～「放射線利用」関連（上段）／「放射線防護」関連（下段）～

設問	H25/2013	H26/2014	H27/2015	H28/2016	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020
II-1-1	ガンマ線とイオンビームの生物効果比（RBE）の特徴	放射線の直接効果と間接効果、DNAに対する効果	LET（線エネルギー付与）とRBE（生物学的効果比）	放射線の直接効果と間接効果	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
	ICRP放射線防護の目標と目標達成のための3原則	物理学的半減期、生物学的半減期、実効半減期	等価線量と実効線量の定義と放射線リスク	内部被ばくによる障害を低減させるための薬剤投与	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	金属系、有機系物質へのイオン及び中性子の照射効果	X線を利用した無機系材料、生体系物質のイメージング	イオンビームを用いた元素分析法	加速陽子による中性子及びμ粒子の生成方法	農業・食品分野で実用化されている放射線利用技術	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）
	自然放射線と人工放射線	過剰相対リスク、過剰絶対リスクを用いた放射線リスク評価	鉛、タングステン、アクリルを用いた遮へい	ICRP勧告（1977）での放射線防護の三原則	「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	農業分野で用いられる放射線利用技術	放射線を利用した医療診断技術	放射性同位元素を用いた物質動態の可視化	量子ビーム	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
	Sn法（離散座標法）、モンテカルロ法による遮へい設計解析	吸収線量、実効線量、等価線量、1cm線量当量の違い	確定的影響、確率的影響において発生する障害	サーベイメーターのエネルギー特性改善	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	加速器質量分析法の利用核種と原理	放射線を利用した2種類の水素原子検出方法	食品への放射線照射の効果	工業、農業、医療分野で利用されている放射線	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
	放射線管理区域の根拠となる4種類の法令	内部被ばく測定手法（鼻孔スミア、対外計測法、バイオアッセイ）	シンチレーション検出器、Ge半導体検出器	自然起源の放射線による外部被ばく	天然放射線核種による内部被ばく	放射性核種の規制に係り、IAEAが挙げる規制免除、クリアランス、規制除外の概念の違い		

II-2-1	放射線核種製造手法開発	放射線の細包への影響調査計画	放射線による品種改良計画	粒子線治療方法の確立	α核種を用いたがん治療薬の開発	イオンビーム加速器施設における加速器の選定	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
	破損が生じた原子力施設等の処理における放射線防護	自然放射線と人工放射線の種類、被ばく形態	避難住民帰還地周辺の空間線量率測定に用いる検出器	アイントープ取扱施設における火災	気体状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	放射線を用いた先端機能性材料の開発	エネルギー可変γ線発生原理、γ線源利用方法	高分子材料の放射線化学プロセス開発計画	材料や製品に対する照射計画	爆発物や核物質を放射線により外部から探査する方法	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線源を使用した非破壊検査装置の実証試験
	汚染環境中の放射線量測定	Ge半導体検出器による測定留意事項	公衆の線量限度が変更（5⇒1 mSv/年）された背景	除染された土壌の置き場での保管	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		

(3) 選択科目Ⅲ

いずれの選択科目においても設問のパターンは同じで、(1) 課題抽出、(2) 解決策、(3) 解決策のリスクと対策と続く。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が良い。必須科目Ⅰとの違いは、設問のパターンに“ (4) 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 ”がなく、概念に“ 応用能力 ”がなく、評価項目に“ 技術者倫理 ”がない点である。必須項目Ⅰのパターンで練習しておいて、選択科目Ⅲを解答する時にその違いに留意すれば良いだろう。また、当然であるが、出題内容は必須科目Ⅰの方が一般的で、選択科目Ⅲの方がより専門的になっている。「平成31(2019)年度技術士試験の概要について」に記載されている出題内容は下記である。

～「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～

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、「選択科目」に関わる観点から課題の抽出を行い、多様な視点からの分析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

出題傾向としては、選択科目Ⅱの項目も含めると、令和2年度は「原子炉システム・施設」と「核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分」で2問中2問とも過去と類似の項目が出題された。「原子炉システム・施設」では新規規制基準に基づく検査に関連する出題が3年連続している。この分野における最大の懸案が、原子力発電所の再稼働であるためであろう。「放射線防護及び利用」では2問中1問が類似だった。「放射線防護及び利用」の他の1問は、RI施設と大線量/大規模加速器施設の違いはあるものの、緊急時対応に関する出題で、放射線取扱主任者試験で出されるような問題だった。「放射線防護及び利用」で受験する場合は、放射線取扱主任者試験の問題も参考になる。選択科目Ⅱと選択科目Ⅲの内容には大きな違いは無く、相互に混じっているため、過去問を確認する際には、それぞれの評価項目に含まれているコンピテンシーの内容を検討しておくことを推奨する。

～「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	H25/2013	H26/2014	H27/2015	H28/2016	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020
III-1	地震・津波起因のSA発生防止, 影響緩和	FRAs等のリスク評価手法の適用	共通要因による安全機能の一斉喪失の防止	次世代の原子炉システムの技術的課題	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	次期炉のより安全で合理的な設計に向けた現行規制基準に基づく既設炉の安全性向上対策の課題
	外部自然現象からの防護	事業者として優先的、自発的に取り組むべき安全性向上策	原子力プラントへのロボット技術導入	実用発電炉の原子力防災上の計画・指針	プラントの停止状態が続く状況での運転・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	次世代原子力システム	過酷事故対策を含む安全性向上, 信頼性・効率向上	中小型炉を実用化するにあたっての技術的課題	1F事故を踏まえた, 新設プラント安全設計の強化	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確実な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
	原子力発電所の定検の実施を規定する法令と定検計画	運転期間延長認可制度	原子力プラントにおけるシビアアクシデント用計測系	過酷な外的事象で複数防護策が同時に破られる想定に対する方策	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		

～「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	H25/2013	H26/2014	H27/2015	H28/2016	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020
III-1	核燃料サイクル施設の性能未達設備の問題解決	今後の使用済燃料貯蔵対策	ガラス固化設備における不具合事象に対する取り組み	核燃料サイクルの克服すべき技術的課題やトラブル	六ヶ所再処理工場の, 新規規制基準適合の設計基準と重大事故対策	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的実現のための課題
III-2	LWR-MOXリサイクルとLWRワンズルー	1F事故のオフサイト除染	福島事故におけるオンサイトの廃炉計画	核的制限値の事例と未臨界維持のための考え方	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取込み	ロボット等、高度制御機械装置を使用する場合の課題

～「放射線利用」関連（上段）／「放射線防護」関連（下段）～

設問	H25/2013	H26/2014	H27/2015	H28/2016	H29/2017	H30/2018	R1/2019	R2/2020
III-1	粒子線がん治療が広く受けられるための検討	ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)	重粒子線治療における照射技術の高度化	放射線育種で目的以外の不都合な変位が付属する問題	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	極めて大きい放射性同位元素の使用施設または大規模研究用加速器施設の緊急事態への対応
	学術会議提案「被ばくの一元管理」	帰還後住民の放射線管理	LNTモデル成立の背景とLNTモデルでは説明できない事例	SPEEDIとそれによる住民避難活用	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	放射線透過能利用の材料の歪コントラスト形成	原子空孔検出手法に利用する放射線と相互作用過程	放射線を利用した, 汚染大気及び排煙浄化技術	イメージングの考え方と従来からの計画法との違い	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
	放射線の危険性に関する一般公衆の理解	天然起源放射性物質に対するICRP 勧告の立場	ICP-MSを用いた一般環境試料、廃水試料の分析	防護量と実用量の線量単位を全て「シーベルト」としたことによる混乱	放射線の取扱いで被ばくする作業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		

【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] 令和元年度版 原子力白書
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2020/zentai.pdf>
- [4] 日本原子力学会、「原子力のいまと明日」、丸善出版、2019
- [5] 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

4. 必須科目 I の問題と解説

令和 2 年度技術士第二次試験において【必須科目 I】として出題された各設問に対する解答のポイントを以下に示す。

技術士第二次試験では、決められた枚数の解答用紙内に解答を全て書き込むことが求められるが、本稿での解説はあえて制限にとらわれず、受験者に多くの情報を与えることを旨とした。受験者には、解答用紙に記入すべきポイントを絞り込むスキルも求められるため、試験本番までにはポイントを絞り込む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、ご了承ください。

I 次の 2 問題 (I-1, I-2) のうち 1 問題を選び解答せよ。(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。)

I-1 東京電力福島第一原子力発電所事故の汚染状況重点調査地域の住宅地において、活動のために、除染と発生した汚染土壌を含む廃棄物の管理が必要である。被ばくを低減し、かつ過大な負担と環境への悪影響が出ないようにする場合について、以下の問いに答えよ。

- (1) 技術者としての立場で多面的な観点から課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。
- (2) 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示せ。
- (3) 解決策に新たに生じ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) 上記事項を業務として遂行するに当たり、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・留意点を述べよ。

【解答のポイント】

設問に回答するにあたり、福島第一原子力発電所事故後の汚染の状況についてしっかりと把握し、現在進められている除染および廃棄物管理の状況を理解しておく必要がある。また、技術的な課題だけでなく、法律上の課題、国、自治体、住民などとの関係についても留意する必要がある。

オフサイト除染の現状は環境省の資料に詳細がまとめられているので参考にするとよい。

東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、2011 年 8 月に国会で立法措置がなされ、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」(放射性物質汚染対処特措法)が成立した。放射性物質汚染対処特措法に基づく除染を実施する地域には、除染特別地域と汚染状況重点調査地域がある。除染特別地域は、国が直接除染を行う地域であり、警戒区域又は計画的避難区域であった福島県内の 11 市町村が指定されているのに対し、本設問の対象である、汚染状況重点調査地域は、市町村が中心となって除染を行う地域であり、国は、財政的措置や技術的措置を講ずることになっている。

(1) 技術者としての立場で多面的な観点から課題について

①ステークホルダーとの連携

汚染状況重点調査地域は、市町村が中心となって除染を行う地域であり、国は、財政的措置や技術的措置を講ずることになっている。このため、自治体、地元企業、住民との連携を取ることが課題となる。

②法令の遵守

放射性物質汚染対処特措法では、放射性物質に汚染された土壌等は可能な限り減容化し、中間貯蔵施設に移し最終処分を行うことになっている。また 8,000Bq/kg を超える指定廃棄物も可能な限り減容し 10 万 Bq/kg を超えるものは中間貯蔵施設に、それ以下の場合は埋立処分とすることとなっている。その他、最新の法令や、労働基準法などを含めた関連する法令を把握し、遵守できるようにすることが課題となる。

③放射性物質に汚染された土壌等の減容化

原子力発電所内の配管や機器の除染と比較すると、オフサイトの除染は、放射線量(線量)は低いものの対象となる面積、体積が大きいことが特徴といえる。中間貯蔵施設に搬入される除去土壌は、約 2,000 万 m^3 と推計されており、全量そのまま最終処分することは、必要な規模の最終処分場の確保等の観点から実現性が乏しい。このため、処分前の減容化が課題となる。

(2) 課題に対する複数の解決策について

放射性物質に汚染された土壌等の減容化についての解決策として適用が考えられる技術を複数示す。

①土壌の分級処理技術

- ・分級処理は、放射性セシウムが土壌のうち細粒分(シルト・粘土)に付着しやすいという特性を踏まえ、土壌を細粒分と砂・レキに分離する方法
- ・重金属除去技術として実績があることから、要素技術としては実用化段階の技術が多く、また、大量かつ比較的安価に処理が可能という特徴を有する
- ・重金属の場合と異なり、線量が比較的高くなる分離した細粒分の取扱い、使用した機器のメンテナンスにおける被ばく対策、粘土分の割合が

高い土壌や砂・レキの表面に固着した放射性セシウムの分離等に課題有り

②土壌の化学処理技術

- ・化学処理は、強酸等の溶媒を用いて土壌中の放射性セシウムを溶媒中に溶出させることで土壌からセシウムを分離する方法。溶液中のセシウムは吸着剤等で回収
- ・分級処理と比較して分離の効率が高く、砂質土に加え粘性土にも効果が期待される
- ・分級処理と比較してコスト高。分離後の土壌に含まれる溶媒の処理や吸着剤の安定性評価、放射性セシウムでの技術実証の実績が限定的等の課題有り

③土壌の熱処理技術

- ・熱処理は、土壌に反応促進剤を添加した上で加熱し、放射性セシウムを一旦揮発させ分離した後、冷却・捕集する方法
- ・土壌の性状（砂質土、粘性土）によらず適用でき、高効率で放射性セシウムの分離が可能
- ・分級処理や化学処理に比べてコスト高。処理対象物によっては相当量の反応促進剤が必要となること、土壌の性状・組成が変化した生成物の取扱い等に課題有り

④焼却灰（飛灰）の洗浄処理技術

- ・飛灰の洗浄処理は、一般的に飛灰に付着している放射性セシウムが水に溶けやすい特性を踏まえ、放射性セシウムを水に溶出・分離する方法。水溶液中のセシウムは吸着剤等で回収
- ・高効率で放射性セシウムの分離が可能
- ・排水処理や吸着剤の安定性評価、放射性セシウムでの技術実証の実績が限定的等の課題有り

⑤焼却灰（主灰・飛灰）の熱処理技術

- ・焼却灰の熱処理は、必要に応じて反応促進剤を添加した上で加熱し、焼却灰中の放射性セシウムを一旦揮発させ分離した後、冷却・捕集する方法
- ・主灰・飛灰によらず適用でき、高効率で放射性セシウムの分離が可能
- ・洗浄処理に比べてコスト高。処理対象物によっては相当量の反応促進剤が必要となること等の課題有り

(3) 解決策に新たに生じうるリスクとそれへの対策について

処理時に高い濃度のセシウムが分離されるため、局所的に線量が高くなる部分が生じ、不測に高い被ばくをするリスクがある。これへの対策として、事前に線量が高くなることを予測するとともに、高い線量となる部分を遮へいすることや排風設備を設置することなどの対策を実施する。また、環境への放出を抑制するためにフィルタを設置するなどの対策も実施する。

(4) 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・留意点について

ステークホルダーとの連携、法令の遵守、放射性物質に汚染された土壌等の減容化などを継続的に実施できるようにするため、情報収集や工程管理を実施し、適切な判断ができるようにするとともに、改善活動を常に実施していく。業務を継続的に実施するために、対象土壌の放射能濃度と物理減衰による経時変化を考慮し、コストと効果を評価して、最も効果的な処理方式や実施時期を決定する。

【参考文献】

- [1] 環境省ホームページ放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和元年度版）第9章 事故からの回復に向けた取組
https://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/pdf_r1/2019tk2s09.pdf
- [2] 原子力委員会資料 東日本大震災からの被災地の復興・再生に向けた環境省の取組
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siry02021/siry02/1_haifu.pdf
- [3] 環境省除染情報サイト 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発単独検討会
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/

【類似問題】

- ・令和元年度 核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分Ⅱ-2-1
- ・令和元年度 核燃料サイクル及び放射性廃棄物の処理・処分Ⅲ-1
- ・平成30年度 放射線防護Ⅲ-1
- ・平成29年度 核燃料サイクルⅡ-2-2
- ・平成28年度 放射線防護Ⅱ-2-2

I-2 東京電力福島第一原子力発電所事故は、多くの国民に大きな被害や影響を及ぼし、このため、国民の原子力への不信や不安は依然として根強く残っており、原子力利用の前提となる国民からの信頼回復が不可欠とされている。原子力関係者にはリスクコミュニケーションによって、原子力開発・利用に関して国民及び地域住民との合意形成を図っていく努力が求められている。

(1) 原子力の開発・利用に関する諸課題について、リスクコミュニケーションによる国民及び地域住民との合意形成を進めて行くことに際し、技術者の立場で多面的な観点からリスクコミュニケーションについての課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。

(2) 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示せ。

(3) 解決策に新たに生じ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) 上記事項を業務として遂行するに当たり、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・留意点を述べよ。

【解答のポイント】

本問は、原子力委員会の平成29年度原子力白書¹⁾で取り上げられた「特集：原子力分野におけるコミュニケーション～ステークホルダー・インボルブメント～」からの出題と考えられる。東京電力福島第一原子力発電所の事故による国民の原子力への不信・不安は根強く、それに真摯に向き合う姿勢やコミュニケーション強化の重要性が示されている。また、諸外国の取り組みも紹介しながら、意思決定の過程でステークホルダーの参画を高めるステークホルダー・インボルブメントという考え方が示されており、リスクコミュニケーションを考える上で是非参考にしていきたい。

リスクコミュニケーションの定義については、文部科学省の安全・安心科学技術及び社会連携委員会が作成した「リスクコミュニケーションの推進方策」²⁾が参考になる。これによれば、リスクコミュニケーションとは「リスクのより適切なマネジメントのために、社会の各層が対話・共考・協働を通じて、多様な情報及び見方の共有を図る活動」とある。また、リスクコミュニケーションを、ステークホルダー間の異なる意見や価値観の画一化を図り、一つの結論を導き出すことを可能にする手段と考えることは適当ではなく、これを十分認識し、ステークホルダーが広く互いの立場や見解を理解し合った上で、それぞれの行動変容に結びつけることのできる「共感を生むコミュニケーション」の場となることを目指すべきとしている。このことを踏まえ、各設問を考えていくことが重要である。

(1) 原子力リスクコミュニケーションの課題

原子力であるが故にコミュニケーションを難しくしているものは何か、その様な観点で考えると課題が見えてくる。以下に参考例を示すが、実際に解答を作成する際は一般論に留まることなく、出来る限り原子力・放射線に係る専門技術を交えて論じることが重要である。

①原子力・放射線の科学技術は一般の人々にとって理解が難しい

原子力・放射線の科学技術は専門性が高く、一般の人々には馴染みの無い分野である。例えば放射線による障害とは、電離放射線の生物学的作用により生体の細胞や組織が変化し、細胞の分裂阻害、変異、死滅、組織の破壊などの現象が生じ、これらが原因となって生じるものである。また、その発生は原子核の崩壊という複雑な現象に起因するものであり、非専門家の多くの人々にとって簡単に理解できるものではない。この様な知識や技術のギャップは、専門家と一般の人々が対等な議論を進める上で大きな障害となる。

②原子力・放射線のリスクは専門家と一般の人々の間で認知に違いがある

放射線は五感で感じることができず、そして一度事故が起きると福島第一原子力発電所で発生した事故のように、大規模・重大被害の可能性がある。また、文部科学省の安全・安心科学技術及び社会連携委員会が作成した「リスクコミュニケーションの推進方策」²⁾によれば、事業者や行政、専門家と言った発信側は、確率論的事象としてリスクを操作的に認識するのに対し、一般市民等の受け手側は必ずしも確率論的事象ではなく、広く概念的及び感覚的にリスクを認知するのが一般的である。この様なリスクの性質、捉え方の違いにより、受けて側は専門家が考えるよりも大きな懸念を抱く傾向にある。

③原子力・放射線の問題は不確実性の影響が大きく科学だけでは解決できない

参考文献[5]によれば、「原子力発電所の多重防護設備を例にすれば、事故の際にこれらが同時に全て作動できなくなるとどうなるかという問いは、専門家の意見が重大な事態になるという点で一致するという意味で科学が解答を与えることのできる科学的な問いである。他方、多重防護設備が同時にすべて作動できなくなるといった事態は極めて低い確率であるから想定しなくてもよいか否かという問いになると専門家の意見は分かかれ、科学が解答できる領域を超えた問いになる。つまり、科学に問うことはできるが、科学だけでは答えることのできない問題で、トランスサイエンス的問題と呼ばれる。」とある。科学技術に基づく議論を十分に行う必要はあるが、専門家だけにそのあり方の議論をまかせることはできない問題と言える。

(2) 原子力リスクコミュニケーションの課題解決策

上述した課題の中で、①と②への取り組みは、今後より一層の努力が求められるものの、従来から広く認識されたものといえる。これに対し

③は、1970年代に提唱されたものではあるが、東日本大震災での東京電力福島第一原子力発電所事故を機に、原子力事故に内在する不確実性の観点から改めてその重要性が見直された課題である。原子力委員会の「原子力利用に関する基本的考え方」^[3]においても、その認識を持って取り組むことの重要性が謳われている。また、日本原子力学会標準「リスク評価の理解のために」^[4]においても、トランスサイエンスというワードが使われている。

トランスサイエンス的問題への取り組みについて、その提唱者であるワインバーグは、専門家のみで意思決定をすべきではなく、民主主義社会においては専門家を含む社会全体で討議しつつ決定するしかないと主張している^[5]。このことは、震災前のように情報や既に決定したことを一方的に提供しそれを理解・支持してもらうことを主眼とするものでなく、公正なリスク情報を共有し人々の自己決定権に働きかける双方向対話の重要性を示唆している。

これについては、平成29年度原子力白書^[1]でまとめられたステークホルダー・インボルブメントという考え方が参考になる。諸外国の事例も参考にしながら、我が国のコミュニケーション活動について今後の在り方を整理したもので、その要点は図1の通りである。コミュニケーションの本質は信頼の構築にあると捉え、研究成果等による根拠情報や政策情報などの情報体系の整備や、双方向コミュニケーションへの積極的な取り組み、また、ステークホルダーの意思決定への参画に取り組むものである。

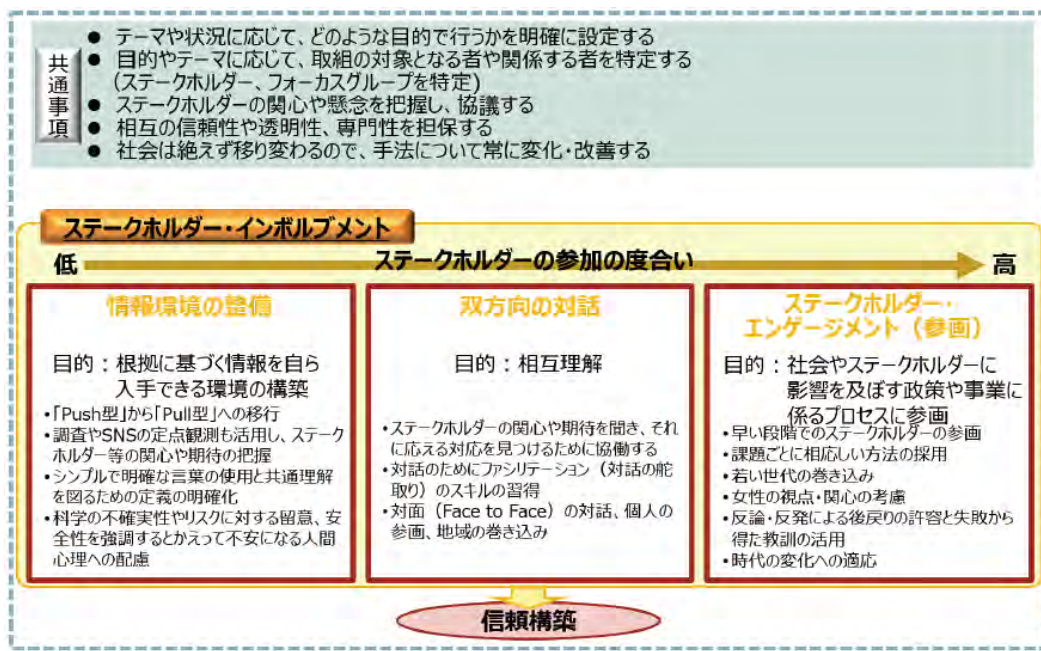


図1 ステークホルダー・インボルブメントの要点^[1]

(3) 解決策に生じうるリスクと対策

文部科学省の安全・安心科学技術及び社会連携委員会「リスクコミュニケーションの推進方策」^[2]で言及されている「媒介機能を担う人材の中立性と専門家の独立性」が確保できないことがリスクとして考えられる。リスクコミュニケーションにおいては、それを実践、企画・運営する、又は場の進行やまとめを行う機能を担う人材(媒介機能を担う人材)の中立性がとりわけ重要になる。一般に、専門家が媒介機能を担う人材となる場合、専門家には特定のステークホルダーの利害によらない、科学的な根拠に基づいた独立性のある発信をすることが求められる。一度特定の立場寄りと思なされると独立性に疑念を持たれ、立場や見解の異なるステークホルダーをつなげる媒介の機能を果たせず、リスクコミュニケーションが機能しなくなる場合があることに留意する必要がある。また、リスクコミュニケーションに際し、専門家には、断片的な知識・情報の提供にとどまらず、蓋然性の高いシナリオを描く役割が期待される。しかし仮に、非常に低確率と発信した事象が起きた場合の被害に対する責任など、専門家がリスク情報に関する結果責任を常に負うことになる場合、専門家は萎縮して対外的な発信を控える傾向になることが想定される。

リスクコミュニケーションを推進するに当たっては、媒介機能を担える人材をはじめリスクコミュニケーションを適切に行える人材の育成・確保が重要となる。リスク情報を正確かつ中立的に受け手側に配慮しながら発信する、又はステークホルダー間の連携や調整を行う媒介機能を担う人材の育成や、トレーナーの育成、サポート体制の整備が対策として求められる。

(4) 技術者倫理、社会の持続可能性の観点で必要な要件、留意点

原子力の開発・利用に係り、今後、リスクコミュニケーションが求められるテーマとしては、原子力発電のコスト、低線量被ばく時の健康への影響、地震や津波などの外的事象やテロに対する原子力安全、原子力災害時の避難計画、福島第一原子力発電所のトリチウム水の海洋放出、放射性廃棄物の処理・処分、使用済燃料と核燃料サイクル政策等が挙げられる。これら諸課題について、原子力・放射線に関わる技術者としてどう在るべきか、技術者倫理とSDGsの観点で整理しておきたい。参考文献[6][7]では、リスクコミュニケーションについて深い考察がなされて

おり、これらも是非参考にさせていただきたい。

【参考文献】

- [1]原子力委員会「平成29年度版原子力白書」平成30年7月
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/index.htm>
- [2]文部科学省 安全・安心科学技術及び社会連携委員会「リスクコミュニケーションの推進方策」平成26年3月27日
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu2/064/houkoku/1347292.htm
- [3]原子力委員会「原子力利用に関する基本的考え方」平成29年7月20日
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/sitemap/bunya22.htm>
- [4]日本原子力学会「リスク評価の理解のために：2020」(AESJ-SC-TR011: 2020) <http://aesj.net/hp/2020/08/12/aesj-sc-tr011/>
- [5]小林 傳司「トランス・サイエンスの時代の学問の社会的責任」学術の動向 2012年17巻5号 p. 5_18-5_24
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/17/5/17_5_18/_article/-char/ja/
- [6]山野 直樹「リスクコミュニケーション再考 原子力リスクの再構築」日本原子力学会誌, Vol. 57, No. 2 p. 109-113 (2015)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/57/2/57_109/_article/-char/ja/
- [7]佐藤 映子「福島原発事故から見てきたリスクコミュニケーションを巡る課題への一考察」日本原子力学会誌, Vol. 58, No. 8 p. 109-113 (2016) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/57/2/57_109/_article/-char/ja/

5. 選択科目Ⅱの解説

令和2年度技術士第二次試験において【選択科目Ⅱ】として出題された各設問に対する解答のポイントを以下に示す。

技術士第二次試験では、決められた枚数の解答用紙内に解答を全て書き込むことが求められるが、本稿での解説はあえて制限にとらわれず、受験者に多くの情報を与えることを旨とした。受験者には、解答用紙に記入すべきポイントを絞り込むスキルも求められるため、試験本番までにはポイントを絞り込む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、ご了承ください。

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 原子力発電の安全目標とは何か、歴史的な経緯を含めて説明せよ。また、国内での現状の安全目標に係る状況について述べよ。

【解答のポイント】

(1) 原子力発電の安全目標とは何か、歴史的な経緯

安全目標とは、原子力発電所を利用することに伴うリスクを具体的に定めたものであり、日本の場合には、規制当局や事業者が目指すべき目標でもある。

その歴史的な経緯としては、民生用の原子力発電が実用化される以前から米国原子力委員会（AEC）では公衆の安全確保のための研究がなされており、その成果としてWASH-3（1950）で人の居住を禁止する排除区域の設定と排除区域半径の算定式を提案した。

米国初の商用発電所であるシッピングポート発電所が開通した1957年には、公衆に被害をもたらす大事故がどのように起こり得るのかについて評価を試みたWASH-740（1957）を発表している。

また、1973年に発表したWASH-1250では、多重障壁・深層防護を基本とする安全設計思想と設計基準事故評価、すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきとするALARA概念（ALARA：As Low As Reasonably Achievable）による一般公衆の放射線影響の制限等の提案を行っている。

その後、1975年に原子力発電所の確率的リスク評価PRAの評価結果（ラスムッセン報告）がWASH-1400で報告され、1979年に発生したTMI事故によって、PRAの有効性が確認された。

IAEAは、1988年に「基本安全原則」（INSAG-3）として安全目標の枠組みを提案。さらに、1999年にはINSAG-3を改定したINSAG-12を定め、安全原則、安全要件、安全指針の安全基準体系化を行った。これらは、これから安全目標を制定しようとする加盟国を念頭になされたもので、この中には、深層防護や安全設計基準事象に対する決定論的要求等も含まれており、安全目標体系の広義の定義と考えられる。

一方、米国NRCは1986年に2つの定性的目標と2つの定量的目標から構成される安全目標政策声明を発表した。このうち、定量的目標は確率的目標のみで構成されている。

また、日本では、2003年に原子力安全委員会が原子力安全目標専門部会の中間まとめとして、定性的目標案と定量的目標案から構成される「安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ」を報告した。原子力規制委員会は、2014年に原子力安全委員会の安全目標案を追認する形で安全目標を定めた。

(2) 国内での現状の安全目標に係る状況について

1) 原子力規制委員会における「安全目標」に関する議論

原子力規制委員会では、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて策定した実用発電用原子炉に関する新規制基準の策定に並行して、規制を行っていく上での原子力規制委員会の姿勢を示すため、公開の定例会において議論を実施した。この中で、放射性物質による環境への汚染の視点も取り込むべきとの見解から、発電用原子炉については、事故時のセシウム137の放出量が100テラベクレルを超えるような事故の発生頻度は、100万炉年に1回程度を超えないように抑制されるべきとの条件の追加を提言した。

2) 新規制基準適合性審査におけるPRAの取扱い

事業者は、重大事故等対策を講じていないプラント状態における炉心損傷頻度や格納容器機能喪失頻度について、PRAを実施して評価する事故シナリオを抽出・特定する。原子力規制委員会は、新規制基準適合性審査で、これら特定された事故シナリオに対する対策の妥当性を確認する。

3) 実用発電用原子炉の安全性向上評価の取組み

事業者は、施設定期検査ごとに、新規制基準適合のための対策やその他の自主的に実施した安全向上対策を含めたプラント状態を対象に、内部事象及び外部事象の再評価、PRA等の安全性向上に係る評価を自ら行い、その結果を原子力規制委員会に届け出る。

4) 原子力規制委員会「実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について」

原子力規制委員会は、新規規制基準の内容や根拠となる考え方を解説する資料「実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について」を策定し、新規規制基準と安全目標の関係を示した。

- ・安全目標は基準ではなく、規制を進めていく上で達成を目指す目標である。
- ・事業者は、安全性向上のための評価を実施し、その結果を原子力規制委員会に届け出る。
- ・安全目標を参考とする取組により、発電用原子炉施設の安全性について継続的な向上を図ることができる。

【参考文献】

- [1] 弥生研究会, 安全目標に関する研究会 [編], 「安全目標」再考: なぜ安全目標を必要とするのか?, UTNL-R-497, [東京大学大学院工学系研究科原子力専攻], (2018)
- [2] 成合英樹, 「原子力発電プラントの安全目標」, 『学術の動向』2016年21巻3号 p.3_39-3_43, 公益財団法人日本学術協力財団, (2016)
- [3] 原子力規制庁, 「安全目標と新規規制基準について(議論用メモ)」, 2017年8月7日

II-1-2 原子炉圧力容器鋼材の照射脆化を説明せよ。また、監視試験片による監視及び原子炉圧力容器の構造健全性評価について述べよ。

【解答のポイント】

「照射脆化」、「監視試験片による監視」、「原子炉圧力容器の健全性評価」について説明するという3つの問題への解答を専門的知識とその応用という観点で踏まえながら600字の制限内で記載するには、解答を簡潔にしながらかも、キーワードやポイントに抜け落ちの無いことに配慮することが望ましい。

「照射脆化」については、原子炉圧力容器(RPV)に用いられている低合金鋼が、供用期間中に中性子の照射を受けると、銅等の不純物元素の拡散に伴う溶質原子クラスターの形成や結晶格子中の原子のはじき出しによる格子欠陥の形成といった微細な組織変化が生じることを記載するようにしたい。また、中性子照射により鋼材の強度、硬さが増加するとともに、延性や韌性が低下するといった機械的性質が変化することを示すようにしたい。

次に、「監視試験片による監視」については、まず、国からの要求事項や民間規程(日本電気協会 電気技術規程等)の要件について述べておきたい。監視試験に用いる試験片が、中性子の照射領域にあるRPV材と同等の製造履歴を有することや、評価対象が母材、溶接金属、溶接熱影響部であることを示しておきたい。そして、RPVが運転中に受ける中性子や温度と同等の条件になるように監視試験片が配置されており、また、中性子束は将来の脆化を予測するためRPVよりも高い条件となる位置に配置されており、監視試験片を計画的に取り出して監視試験を行うという運用を示しておく。また、監視試験により、中性子照射による鋼材の機械的性質の変化の程度を関連温度の上昇や上部棚エネルギー(USE)の低下等により把握し、継続的な安全運転のためにRPVに求められる破壊韌性を維持していることが確認されていることを示すようにしたい。

さらに、「原子炉圧力容器の構造健全性評価」については、プラントの各供用状態におけるRPVへの圧力・温度制限ならびに漏えい試験時に設定する最低温度につき民間規程の要求を満たすこと、また、RPVの炉心領域に対する破壊韌性値の要求として上部棚エネルギー(USE)予測値が民間規程の要求を満たすこと、ならびに、PWRの設計基準事故時及び重大事故等時における加圧熱衝撃(Pressurized Thermal Shock ;PTS)事象への評価等についておさえておきたい。さらに、この評価結果に基づき、原子炉冷却材温度及び圧力の制限範囲を設定することを定めて、RPVの非延性破壊を防止するよう評価が進められ、構造物が安全に管理されることを述べるようにしたい。

II-1-3 原子炉施設における「個人の信頼性確認制度」の目的と概要について述べよ。

【解答のポイント】

我が国において、個人の信頼性確認とは、IAEAの勧告を踏まえ、原子炉施設における内部脅威対策の一つとして、常時立入証の発行、核燃料物質の防護に関する秘密を業務上知り得る者の指定に先立ち、個人に関する情報、テロリズム・暴力団に関する事項の自己申告・面接、アルコール・薬物検査等に基づき妨害破壊行為等を行うおそれがあるか否か、又は秘密を漏らすおそれがあるか否かの確認を行う措置である。^[1]

「個人の信頼性確認制度」の背景として、このIAEAの勧告から、核物質及びその他の放射性物質が関与する悪意のある行為から、人、財産、社会及び環境を防護することを目的としていることを理解する。また、(1)項に示すIAEAの勧告を理解し、個人の信頼性確認制度の国際的な規制要件を把握する。

次に、(2)項で我が国の個人の信頼性確認制度の概要からIAEAの規制要件を満足していることを確認する。また、(3)項に示す我が国の個人の信頼性確認制度の対象施設と関係規則を、まとめておくことが重要である。

(1) IAEA 核物質及び原子力施設の物理的防護に関する核セキュリティ勧告

IAEA の勧告の翻訳である、核物質及び原子力施設の物理的防護に関する核セキュリティ勧告 (INFCIRC/225/Rev. 5) ^[2] の信頼性確認制度関連部分について以下の記載がある。また、参考資料[1] (別紙 1) に関連部分の和英併記があるので参照されたい。

- a. 立法上及び規制上の枠組み
国は、個人の信頼性判定が要求される状況及び如何に実施するかを明確にするための個人の信頼性に関する方針を決定すべきである。
- b. 秘密保持
機微情報にアクセスする人の信頼性が情報の秘密保持に対して適切であると確認され、かつその職務上知る必要のある者だけにアクセスを制限すべきである。
- c. 区分 I*及びII* 核物質防護の要件
防護区域への付き添いなしで立入りを許可される者は、その個人の信頼性が確定された者に限定されるべきである。
- d. 区分 I*核物質の要件
内部区域への立入許可は信頼性確認がされた者に限定すべきである。
- e. 原子力発電所を含む高影響施設の要件
防護区域への付き添いなしで立入りの許認可を受けた者は、その個人の信頼性が確定された者に限定されるべきである。
*: INFCIRC/225/Rev. 5 に定義されている、元素、同位体、数量及び照射の観点からの核物質の区分

(2) 個人の信頼性確認制度の概要^[1]

- a. 原子力施設の防護区域等の重要な区域に業務上常時立ち入ろうとする者、及び特定核燃料物質の防護の秘密を取り扱う者の指定を受けようとする者について、あらかじめ、妨害破壊行為等を行うおそれがあるか否か又は秘密の取扱いを行った場合にこれを漏らすおそれがあるか否かについての確認を行う。
- b. 対象者の履歴、外国との関係、テロリズムその他の犯罪行為を行うおそれがある団体 (暴力団を含む。) との関係、事理を弁識する能力及び防護に関連する犯罪や懲戒の経歴を調査し、確認を行う。
- c. 原子力規制委員会が定める告示に従い、申告書その他の書類の提出・提示を求める方法、対象者との面接、対象者の性格等に関する適性検査その他必要な方法により調査し、確認を行う。
- d. あらかじめ、対象者に対し、確認の実施に際し知り得た情報の漏えいや目的外利用を防止する措置を講じていることその他必要な事項を説明し、個人情報利用について対象者の同意を得た上で確認を行う。
- e. 確認を行った結果、対象者について、妨害破壊行為等を行うおそれがあり、又は特定核燃料物質の防護に関する秘密を漏らすおそれがあると認められる場合 (d. に規定する同意が得られない場合を含む。) は、対象者に対し、常時立入りに係る証明書等の発行・業務上知り得る者の指定を行わない。
- f. 常時立入りに係る証明書等及び業務上知り得る者の指定の有効期間は、5 年とする。ただし、有効期間内であっても、事情の変更により特別の必要が生じたときは、改めて確認を行う。
- g. 常時立入りに係る確認の措置は、次の区域等について講じる。なお、一時立入者が次の区域等に立ち入る場合には、常時立入者の監督を義務付ける。防護区域・安全保護装置周辺区域/中央制御室外停止装置/防護区域外防護対象枢要設備の周辺区域/見張人の詰所・監視所

(3) 個人の信頼性確認の対象となる施設と関係規則

実用発電用原子炉施設、研究開発段階発電用原子炉施設、再処理施設及び特定原子力施設については、「使用済燃料の再処理の事業に関する規則等の一部を改正する規則 (平成 28 年 9 月 21 日原子力規制委員会規則第 10 号)」により関係規則※を改正して個人の信頼性確認に係る規定を追加している。

※ 平成 28 年 9 月に改正した関係規則

- ①使用済燃料の再処理の事業に関する規則^[3]
- ②実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則^[4]
- ③研究開発段階発電用原子炉の設置、運転等に関する規則^[5]
- ④東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則^[6]

【参考文献】

[1] 個人の信頼性確認制度の導入に伴う核物質防護規定変更認可申請について、平成 29 年 8 月 3 日、原子力規制庁

<https://www.nsr.go.jp/data/000198470.pdf>

[2] 核物質及び原子力施設の物理的防護に関する核セキュリティ勧告 (INFCIRC/225/Rev. 5)、2012 年 6 月

<https://www.nsr.go.jp/data/000125920.pdf>

[3] 使用済燃料の再処理の事業に関する規則

https://www.nsr.go.jp/law_ki_jyun/law/saishori_kisoku.html

[4] 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則

https://www.nsr.go.jp/law_kijyun/law/jitsuyou_kisoku.html

[5] 研究開発段階発電用原子炉の設置、運転等に関する規則

https://www.nsr.go.jp/law_kijyun/law/kenkyu_kisoku.html

[6] 東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則

<https://www.nsr.go.jp/activity/earthquake/kisei/index.html>

II-1-4 原子炉施設の廃止措置段階における安全確保の考え方を、その特徴を踏まえて述べよ。

【解答のポイント】

原子炉施設の廃止措置とは、運転が終了した後、炉規制^[1]が終了するまでの間に行う一連の措置（核燃料物質の譲渡、汚染除去、廃棄など）を指す。廃止措置の方式は、密閉管理（安全貯蔵または遅延解体）、遮蔽管理（埋設処分）、解体撤去（即時解体）の三つに分類されるが、実際は放射能の減衰を待たために密閉管理を一定期間行った後、解体撤去作業を行うことが多い。炉規制（第43条の3の34の2項）ではあらかじめ廃止措置計画の認可を受けることを規定しており、その認可の基準は実用炉規則^[2]の第119条に規定されている。その1項に、廃止措置計画に係る発電用原子炉の炉心から使用済燃料が取り出されていることを条件としているため、廃止措置計画に従って実施される場合、原子炉施設の廃止措置は主に解体作業となる。解体に係わる安全確保については旧原子力安全委員会の安全審査指針（旧指針）^[3]に示されており、ALARAの考え方に基づき以下を安全上重要な事項として計画を立てる必要があるとしている。

- (1) 解体中における保安のために必要な原子炉施設の適切な維持管理の方法
- (2) 公衆及び放射線業務従事者の放射線被ばくの低減策
- (3) 放射性廃棄物の処理等の方法

また、原子炉施設を解体することは、放射性廃棄物を分類処理することであって、その特徴として以下を列記している。

- (1) 炉内構造物から放射能レベルの比較的高い廃棄物が発生する。
- (2) 遮へいコンクリート等から放射能レベルの低い廃棄物が大量に発生する。
- (3) 解体の進行に伴って当該施設内の放射線レベルが変化する。
- (4) 解体の進行に伴って保安に必要な設備等の状況が変化する。

従って、廃止措置の実施に当たっては事前の計画が重要となる。廃止措置計画書には、本文の他に、放射線被ばくの管理、想定事故の影響、核燃料物質による汚染の分布とその評価方法、廃止措置中に機能を維持すべき施設および性能とその期間に関する説明書等の添付が求められている。

解体計画の作成では、施設内の機器および構造物の特性（重量、形状、材質、放射能、設置場所など）を考慮して、種々の解体作業（従来工法による解体作業、遠隔解体作業、建屋の除染・測定作業、および、建屋解体作業など）とそれぞれの作業項目（準備、切断・収納、片付けなど）の組合せから構成される作業階層構造（Work Breakdown Structure: WBS）^[4]を作成し、放射化放射能の評価で算出した放射能インベントリおよび放出放射能から被ばく経路別の被ばく線量を評価して、安全性を確認する必要がある。

核燃料が撤去された後の施設内に残存する放射性物質の評価は、放射化放射能の評価と二次的な汚染の評価により行われる。放射化放射能の評価は、原子炉の運転で発生した中性子フルエンス率の分布をもとに、放射化による放射性核種の生成と崩壊を評価して、放射性核種濃度およびその量の分布を計算する。二次的な汚染は、機器や配管などの系統全体に広がった表面汚染を、代表点の試料採取と外部からの線量当量率測定を組み合わせて評価する。

公衆の被ばく線量は、平常時と事故時について評価する。

平常時における周辺公衆の被ばく線量評価は、環境へ放出される放射性的な気体や浮遊粉じんの放出放射能評価と、放出後の被ばく線量評価に分けられる。放出放射能評価では、解体作業に伴って発生した放射性粉じんなどが気相あるいは液相へ移行し、大気および海洋へ放出されることを想定して、経路別に評価する。放出後の被ばく線量評価では、大気に放出された放射性核種に対し、気象データを用いて地表沈着量などを評価し、被ばく経路ごとに周辺公衆の外部および内部被ばく線量を計算する。

事故時における周辺公衆の被ばく線量評価は、以下の手順で行う。

- (1) 解体作業ごとに蓄積された各種移動性インベントリ（事故の想定事象が発生した場合に燃焼などによって作業環境中に飛散する可能性のある放射性物質）の計算
- (2) 想定事象の発生時に対象となる移動性インベントリとその気中移行割合から、大気への放出放射能の算出
- (3) 被ばく経路別に周辺公衆の被ばく線量の評価

なお、旧指針の解説には、事故の誘因となる自然事象には、地震、台風、地すべり等が含まれ、人為事象には、火災、爆発等が含まれると記載されている。

公衆に対する安全確保としては、放射性粉じんの放出低減化を図ることが重要である。粉じんの発生を可能な限り防止する工法を採用するとともに、汚染拡大防止囲い（グリーンハウス）の設置、建屋内の負圧状態管理、および排気設備に適切なフィルタ等を使用することを考慮しなければならない。また、放射性廃棄物の保管時においては、敷地境界外における直接線およびスカイシャイン線量に留意する必要がある。

放射線作業従事者の被ばく線量は、集団外部被ばく線量と集団内部被ばく線量を評価する。解体作業にかかわる作業員の集団外部被ばく線量

は、職種別の作業員位置における平均線量当量率に作業時間を乗じて計算する。平均線量当量率は解体作業の進捗に伴って変動し、作業員位置および作業時間も職種および作業内容によって変動する。これらの変動を評価するために、作業階層構造 (WBS) を利用する。一方、集団内部被ばく線量は、作業領域および時間に応じた空気中の放射能濃度に作業時間、吸引率および各種別実効被ばく換算係数を乗じ、防護係数 (保護具類の効果を定量化した数字) で除して計算する。

作業員に対する安全確保としては、線量率の高い機器を早期に撤去するなどのマネジメントが重要である。旧指針には、VI 章「解体撤去作業における安全確保」の 4 項「放射線業務従事者の放射線被ばく低減対策等」において、以下に留意することが記載されている。

- (1) 系統および機器の除染並びに汚染の拡大防止
- (2) 放射性粉じん等の発生防止および防護具の使用
- (3) 遮へい体または遠隔操作装置の活用
- (4) 作業目標線量の設定
- (5) 放射線モニタリング
- (6) 教育訓練

特に、作業開始前だけでなく作業中も放射線モニタリングを行い、作業目標線量と実測値の比較結果を作業方法の改善等に反映させることは、被ばく低減のために重要である。また、高レベルの管理区域を明確にして不用意な入域防止するとともに、作業要領の事前確認や訓練等を行って、高濃度の放射性物質の取扱い作業を正確かつ迅速に実施することは、不必要な被ばくの防止に資する。

なお、除染では放射性物質は消滅せず物質間を移動するだけであり、廃棄物量が逆に増えることになるので、系統除染の要否は廃棄物処理費用まで考慮した全体費用と被ばく線量を比較し、総合的に判断する必要がある。米国では廃止措置段階における系統除染の実績が少なく、近年では殆ど行われていないとの報告がある。^[5]

【参考文献】

- [1] 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律
- [2] 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則
- [3] 原子炉施設の解体に係る安全確保の基本的考え方
- [4] 長崎晋也・中山真一、原子力教科書／放射線廃棄物の工学、オーム社、2011
- [5] 山内豊明、安全かつ効率的な廃止措置に向けて／米国の原子力発電所廃止措置の教訓、日本原子力学会誌、Vol. 61, 2019, p. 482-488.

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 平成25年に改訂された原子炉施設に係る規制基準において、外部火災・内部火災等に対する法定要求が強化された。実用発電用原子炉施設における火災防護の管理責任者として、火災防護計画の策定・実施に当たり、下記の内容について記述せよ。

- (1) 調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (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】

解答にあたっては、火災防護の管理の観点から、法令要求に基づき火災防護計画の策定・実施について「原子力発電所の火災防護管理指針」などを踏まえて記述することが求められる。

(1) 調査、検討すべき事項とその内容

火災防護計画は、原子力事業者が、原子力発電所において実施される火災防護対策を適切に行うための包括的なプログラムとして定め、この計画に基づき火災防護対策を実施することを目的として策定されるものである。火災防護計画の作成においては、原子力発電所で行う火災防護のために必要な事項を定める。具体的には消防法施行規則 第3条第1項のイ～フのうち、へ及びルを除いた事項が該当し、以下を定めることが要求される。

- a. 火災防護のための原子力発電所内組織に関すること
- b. 火災防護に必要な設備、装備等に関すること
- c. 消防機関との連携に関すること
- d. 教育・訓練に関すること
- e. 火災予防に関すること
- f. 火災発生時の対応に関すること
- g. 鎮火の確認及び鎮火後の処置に関すること
- h. その他火災防護に関すること

(2) 業務を進める手順(留意すべき点、工夫を要する点)

火災防護計画策定の業務にあたっては、大規模な地震により発生する火災が、祝休日または夜間にも発生しうること、同一発電所内で同時に複数の箇所で発生しうること、消火活動において消防機関の支援が直ちに得られない可能性があることに留意する必要がある。

また、新規基準により外部火災として航空機衝突に伴う燃料油火災を想定することも従来の火災防護計画に加えて必要となる。

作成にあたっての承認者を定めておくこと、作成した計画は検証・更新を行い、実効性のあるものとして維持するとともに、最新の内容が確認できること、計画の内容を関係者に周知徹底することも必要である。

(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法

火災防護業務の遂行にあたっては、火災予防及び消火活動に万全を期するため防火管理組織を定めることが重要となる。防火管理組織の体制構築には以下に留意する。

- ・防火管理組織は、火災防護に関する各種対策を改善する権限を持つ体制を構築して取り組むこと
- ・防火管理組織には、消防活動、放射線防護、及びプラント施設等の専門的知識を有する物を含めること
- ・防火管理組織は、原子力発電所の規模、建物数、区域の種別等の管理単位に合わせて、組織及び役割分担を明確にすること
- ・火災防護計画の内容が有効であることを定期的訓練で検証すること
- ・防火管理者は、防火管理の適正を期するため、消防機関と連携を保つとともに、併せて火災発生においても円滑な対応が可能となるよう、日頃から意思の疎通を図ること。(消防計画の届出、教育・訓練指導の要請など)

【参考文献】

- [1] JEAG4103-2009 「原子力発電所の火災防護管理指針」

II-2-2 原子炉施設における新しい検査制度の導入に伴い、保安に関する品質保証活動において是正処置プログラム (Corrective Action Program:CAP) を規定することが義務付けられた。この業務を実施担当責任者として進めるに当たり、下記の内容について記述せよ。

- (1) 調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (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】

福島第一原子力発電所の事故の教訓を踏まえて事業者が導入した「リスク情報を活用した意思決定 (RIDM)」プロセスにおいて、自律的な安全性向上のための重要項目に是正処置プログラム (CAP) が含まれ、原子力安全推進協会 (JANSI) が CAP ガイドラインを作成している。本設問の解答は、このガイドラインに沿うのが適切であるが、残念ながらその内容を確認することが出来なかった。そのため、海外原子力向けの品質保証プログラムの構築経験を基に記載するので参考になれば幸いである。ガイドラインと一致していない点があり、特に関係者とのコミュニケーションは特定の組織だけのケースかも知れないがご容赦願いたい。

- (1) CAP は、スリーマイル・アイランド (TMI) 2 号機事故後の原子力発電所の運転品質向上のために、NRC がその活性化に特に注力している活動である^[1]。NRC は 10CFR50 Appendix B^[2]に準拠した品質保証プログラムとして ASME NQA-1^[3]を是認しており^[4]、米国に於ける CAP の活性化は NQA-1 で規定されている是正処置 (Corrective Action) を効果的に実践することを意味する。従って、CAP を推進する担当者は、NQA-1 Part III 16A の是正処置の要件を理解した上で、自らの組織への CAP 導入方法について、以下を調査、検討する必要がある。

- ・ 既存の品質保証プログラム (品質保証マニュアルなど) や 2 次文書 (要領書など) における是正処置に係わる記載内容の調査
- ・ 既存プログラムとの役割分担など、CAP 導入方針の検討
- ・ 既存の品質保証プログラムおよび 2 次文書の改訂方針の検討

- (2) ある講演で、TMI では年間 3000 件の是正処置要求 (Corrective Action Request; CAR) を処置する様になって、やっとな CAP の効果が出始めと聞いた (日本では状態報告 (Condition Report; CR) として広く情報を収集して処置している)。CAP を有効に機能させるには、CAR による品質に反する状態 (Condition Adverse To Quality; CATQ) の指摘、重要度の識別、原因分析あるいは必要に応じて根本原因分析 (Root Cause Analysis; RCA) ^[5]の実施、是正処置の立案、計画、実施、有効性の確認のサイクルを継続的に数多く実施することが求められる。その実現のためには、CAR 発行のしきい値を下げ、品質保証活動のあらゆる場面で、誰でも CAR を起草できる様にする必要がある。十分な数の CAR を処置出来る様になれば、統計分析を行い、その結果 (トレンド) をマネジメント・レビュー等で経営層や管理者に報告し、トップダウンによる組織改善につなげることも出来る。ただし、CAP の効果を真に発揮させるためには、CAR の重要度を適切に設定することに留意しなければならない。重要度の評価基準を明確に規定し、評価者を品質保証組織のスタッフ等に限定するなどの工夫が必要となる。

CAP の効率的な運用のために数多くの CAR を効率よく処理するには、コンピュータシステムの活用が必須である。先ず、是正処置要求 (CAR) システムを構築する必要がある。その際、“重大”あるいは“極めて重大”な CATQ の是正処置に適用される“根本原因分析 (RCA)”と、“重大でない”CATQ に適用する“表見的原因分析^注 (Apparent Cause Analysis; ACA)”の両方の機能をシステムに組み込むことが望まれる。全ての CATQ に RCA を適用することは過剰であり、要求もされていない。また、CAP システムを短期間で構築するために、組織が有する既存の問題管理システム等を改造あるいは併用する場合は、システム間の連携もしくはインターフェースを工夫して効率良く運用出来る様にする必要がある。例えば、予防処置要求 (Preventive Action Request; PAR) と是正処置要求 (CAR) は共通点が多く、同じシステムで管理することで CAP 活動のメトリックとして PAR も含める場合、集計の手間が省けて効率的である。

CAP に係わる品質保証プログラムおよび 2 次文章を作成して CAP 活動を開始した後、活動を定着し、活性化させるための品質保証活動としては以下を行う。

- ・ RCA を含む CAR システムのマニュアルの整備
- ・ CAP 活動に関する教育・訓練の実施
- ・ 内部監査などによる CAP 活動のモニタリング
- ・ 必要に応じて、CAP 活動活性化のための是正処置要求
- ・ 是正処置状況のフォローアップ
- ・ 是正処置の有効性の確認

注) ACA を「直接原因分析」と訳している場合もあるが、Direct Cause とは定義が異なる。RCA では用語として Direct Cause を用いないように推奨している。

- (3) CAP 活動を効率的、効果的に進めるには、CATQ を出来るだけ数多く見つけて、CAR の処置サイクルを繰り返し実施する必要がある。しかし、例えば内部監査等に於いて指摘を行う方 (監査員) も受ける側 (被監査組織) も指摘を回避したり、故意に重要度を低く設定しようとする場合がある。重大な指摘を受けて RCA を実施することは被監査組織にとって迷惑になると考える監査員もいる。また、特に管理層

には CAR の件数が少ない方が組織の状態が良いと考える傾向もある。従って、CAP 活動を効率的、効果的に進めるには、従事者全員に対して“CAR を数多く処置することが組織の品質改善が進んでいる状態を示すことになる”という意識改革を行う必要がある。特に管理者は是正処置の実施範囲を決定する権限を持っており、その意識改革が重要である。教育・訓練の場だけでなく、あらゆるコミュニケーションの機会を捉えて意識改革を促す必要がある。一方、CAR の重要度の過小評価については、幾ら数をこなしても重大な CATQ の根本原因を是正しなければ CAP の効果（品質向上）は発揮できないこと、つまり、表見的な（見掛けの）原因分析（ACA）による対策では再発を防止できないことを、CAR の重要度の評価者に対して周知徹底する必要がある。

なお、CAP の様な新たなプログラムを組織に導入する場合、約 10%の人は積極的に参加し、約 60%は様子見をし、約 30%は最後まで反対すると言われている^[6]。この約 60%の傍観者に積極的に活動に参加して貰うことが必要で、そのためには事例発表会等を行って活動成果をアピールするなど、活動を周知する（即ち、傍観者のための観客席を用意する）努力を継続しなければならない。一方、反対者の意見に耳を貸し過ぎて活動が骨抜きにならないように注意する必要がある。CAR システムを新たに構築する場合、組織の業務システム管理者の支援が欠かせない。既存システムとの運用を関係者と良く調整する必要がある。時には、既存システムを捨てることも必要となるが、その際に反対者が必ず現れる。反対者に対して十分に説明し、少なくとも信頼を得ることが重要である。新しいシステムを組織に浸透させるには、強いリーダーシップが求められる。その裏付けとなる経営層や管理者からの支持表明、“是正処置プログラムに組織を挙げて取り組む”と言う宣言が欠かせない。

【参考文献】

- [1] 一木邦康、米国原子力発電所における安全文化改善活動に関する分析、INSS journal, Vol. 16, 2009, p. 233-243.
- [2] NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, Part 50, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, Appendix B to Part 50 - Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants
- [3] American Society of Mechanical Engineers, Quality Assurance Requirements for Nuclear Facility Applications, ASME NQA-1-2008 with NQA-1b-2011 Addenda, NQA-1-2012, and NQA-1-2015
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide, Quality Assurance Program Criteria (Design and Construction), RG 1.28, Revision 5, 2017
- [5] 日本電気協会、原子力発電所における安全のための品質保証規程（JEAC 4111-2009）の適用指針 - 原子力発電所の運転段階 - （根本原因分析に関わる内容の充実）、JEAG 4121-2009（2011年追補版）
- [6] エティエンヌ・ウィンガー他、コミュニティ・オブ・プラクティス：ナレッジ社会の新たな知識形態の実践、翔泳社、2002

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 ウラン濃縮の目的, その原理と手法, 装置構成について述べよ。

【解答のポイント】

(1) ウラン濃縮の目的

天然ウランには、熱中性子による核分裂を起こしにくいウラン-238 (^{238}U) が99.3%、核分裂を起こしやすいウラン-235 (^{235}U) が0.7%含まれているが、ウラン濃縮とは、このうちの核分裂性のウラン-235の濃度を高めるために行う同位体分離である。その目的は、ウラン燃料をより臨界させやすい状態に加工することにある。低濃縮ウラン燃料を必要とするのは、主に軽水炉と呼ばれる原子炉であるが、中性子吸収が大きい軽水を減速材として用いるため、核分裂を維持するには濃縮度が3%から5%程度のウラン燃料が必要になる。この炉型の原子力発電所は、安全性や経済性で総合的に有利になる場合が多いため、原子力産業における低濃縮ウランの需要は極めて高い。

(2) ウラン濃縮の原理と手法

核分裂を起こしやすいウラン (ウラン-235) の比率を天然のものより高めることを「ウラン濃縮」といい、その高める方法を「ウラン濃縮法」という。

ウラン-235とウラン-238は、物理的にも化学的にもほとんど同じ性質を持ち、わずかの性質の差により、できるだけ電力消費量が小さく、低コストで濃縮できる技術の開発が進められている。すなわち、ウラン同位体であるウラン-235とウラン-238との質量差を利用する方法として、微細穴を透過するときの拡散速度の違いを用いる「ガス拡散法」、遠心力の場で質量差による違いを用いる「遠心分離法」、電磁場で質量差による違いを用いる「電磁法」、およびノズルから吹き出す速度差を利用する「ノズル法」等が考え出された。また、ウラン-235のみを選択的に分離する「レーザー法」、化学的に酸化還元時の反応差を利用した「化学法 (イオン交換法)」、光化学反応速度差を利用した「光化学的分離法」等がある。

現在、商業用ウラン濃縮工場に採用されているのは遠心分離法であり、遠心分離法については、アメリカ、フランス、イギリス、オランダ、ドイツ、ロシア、中国、日本、ブラジルに商業用ウラン濃縮工場がある。商業用のウラン濃縮技術としては、電力消費量がガス拡散法の約1/50と大幅に少ない遠心分離法が主流となりつつある。

これらウラン濃縮法については、原理は判っているが、濃縮に用いる微細な穴のあいた隔膜や遠心分離機、作業物質として用いる腐食性の高い六フッ化ウランガスを取り扱うための機器等を含めたシステムには各国の独自の技術が利用され、核拡散防止上および商業上の両方の観点から厳重な機密保持が行われている。

(3) ウラン濃縮の装置構成

ウラン濃縮にあたり、供給流としてウランガスを用いる場合、ウランを完全に気化させなければならないが、気化に必要な温度 (約3,800°C) を維持することは技術的に困難である。そこで、ウラン金属をフッ素 (F) と化合させ、六フッ化ウラン (UF_6) とすることで、およそ57°Cで気化させることができる。フッ素には、フッ素-19 (^{19}F) 以外の安定同位体が存在しないため、フッ素化合物として同位体分離を行っても質量誤差が生じない。六フッ化ウランは、まずウランとフッ素ガスを化合させて五フッ化ウラン (UF_5) とした後、さらにフッ素と化合させることにより製造する。

熱拡散法

ウラン-235とウラン-238のわずかな質量差を利用した同位体分離法である。真空筒内に注入した六フッ化ウランのガスを加熱することでガスが上下に対流し、筒の上側に軽いウラン-235、下側に重いウラン-238が集まる仕組みである。

ガス拡散法

細孔 (80～100 オングストローム) を有する隔膜を利用して、この隔膜を透過させることによりウラン-235濃縮度を高める方法をガス拡散法という。この際、使用するウランは、ガス化した六フッ化ウランであり、隔膜の前後に圧力の差をつけて、透過するガスと透過しないガスとに分け、透過するガスはわずかにウラン-235濃縮度が高くなり、透過しないガスはわずかにウラン-235濃縮度が低くなる。理論分離係数は ($^{238}\text{UF}_6$ の質量/ $^{235}\text{UF}_6$ の質量) の1/2乗となり、1.004となる。したがって、理論上は細孔はできるだけ細かい方が良いが、50～100 オングストロームの範囲が適した条件といわれている。

同時に、減損流（隔壁を通過せずウラン-235の比率が減少したガス流）にも多くのウラン-235が残されているため、施設をカスケードで構成し、減損流を再度濃縮工程にかける工夫が施されている。ガス拡散法では、原子炉で用いる濃縮度3%の低濃縮ウランを生成するにもカスケードを数百段以上組む必要があるため、消費電力、所要時間、ともに膨大になる。

また、六フッ化ウランはガス状態で使用されるので、隔壁間の差圧を生じさせるため、加圧ポンプ、吸引ポンプにより圧縮、膨張を繰り返すことになる。この際に、圧縮、膨張により発生する熱を除去する必要がある、冷却系の設備が必要となる。これらの熱収支による電力消費が非常に大きく、濃縮コストの大部分を占めることになる。

遠心分離法

遠心分離法とは、遠心分離機を使ってウラン-235の濃縮度を上げる方法であり、ウラン-235とウラン-238のわずかな質量差を利用した同位体分離法である。そのため、多数の遠心分離機をカスケードに組み、所定の濃縮度のウラン-235を得る。

遠心分離機は音速の数倍程度の周速で回転筒を回し、回転筒内にウラン化合物である気体の六フッ化ウランを入れると、ウラン-235とウラン-238の質量差によって、重いウラン-238の六フッ化ウランは回転筒の円周側に、軽いウラン-235の六フッ化ウランは軸側に分離される。これらの気体の六フッ化ウランを回転筒内のガスの流れを乱すことなく取り出して、濃縮ウランと劣化ウランとする。六フッ化ウランガスの取り出し方法にも工夫がこらされ、端板方式とスクープ方式がある。端板方式とは、上記回転筒の端板にノズルを付けて、軽い気体と重い気体とを抜き出す方法である。スクープ方式は回転筒内に抜き出しパイプを取り付けて抜き出す方式である。

遠心分離機の分離係数は、理論的には質量差の2乗と周速の4乗に比例し、回転筒の長さに比例するといわれている。したがって周速の速いかつ長回転筒を有する遠心機が効率が良いことになる。

ガス拡散法に比べて分離係数が極端に高いため、カスケードの段数はガス拡散法と比較すれば数百分の一でよい。しかし、1台の遠心機の取り扱い量は非常に少ないので並列に幾台も並べる必要があり、濃縮されるに従って台数を減らした理想的カスケードを組むことになる。

ガス拡散法と比較して特徴的なことは、分離係数が高いことと、運転による電力消費量が約1/50と大幅に少ないことである。しかし、遠心分離機は、回転筒を高周速で回転させるために製造面、運転面において高度な技術を要する。

電磁濃縮法

イオン化して軌道に直交した磁場により飛行するイオンにローレンツ力が働き、質量の大きいウラン-238は遠心力で外側の軌道、軽いウラン-235は内側の軌道を通る。質量分析器と同じ原理である。遠心分離に比べて可動部がなく、電力は大量に必要だが、装置の精度は低くても稼働させることができる。

ノズル法

ノズル法（エアロダイナミック法）では、ノズルから多数の気体の流れ、遠心分離される。この気体流体力学的分離方法は圧力勾配で噴出すガスの遠心力を用いる。通常の遠心分離法に比べて可動部が無い。キャリアガスに水素もしくはヘリウムを用いて六フッ化ウランを高速度で流路に流す。

レーザー法

レーザー法の特徴は、分離係数が極めて大きく、1段の濃縮操作で軽水炉級の低濃縮ウランが得られることである。これは、ガス拡散法や遠心分離法が統計的な分離方法であるのに対し、レーザー法がウラン-235のみを選択的に分離し、理論的には100%に近い分離が可能なることに基づく。このようにカスケードが不要であると、濃縮システムをコンパクトにできる。また大出力で効率の良いレーザーを開発できれば、電力消費量を遠心分離法並みか、それ以下にできる。これらのことから、レーザー法では高い経済性が期待される。ただし、高濃縮ウランへの到達が容易であることから、核不拡散上の課題もある。

レーザー法には、原料として六フッ化ウランを用いる分子法と金属ウランの蒸気を用いる原子法とがある。原子法は、天然ウラン金属を加熱してウラン蒸気を発生させ、これにレーザー光をあてることにより、ウラン-235だけをプラスイオンにして、マイナスの電極に集める方法である。一方、分子法は、六フッ化ウランに赤外線レーザーをあてた場合、ウラン-235とウラン-238のフッ素化合物のうち、ウラン-235の方が化学変化をおこして五フッ化ウランになりやすいことを利用し、六フッ化ウラン（気体）と五フッ化ウラン（固体）とを分離してウランを濃縮する方法である。分子法は、分離係数を高くする方法及び選択的に分離した同位体を含む生成物を効率よく回収する方法を見つけていくことができれば原理的にすぐれた方法となる。

化学法（イオン交換法）

同位体効果による酸化/還元反応速度差で異なる価のイオン間で濃度比にわずかな差が生ずる。この差をイオン交換樹脂を利用して分離する。ある一定の濃度以上には濃縮できないので核拡散防止の観点からも注目されている。

なお、以上の手法のうち、電磁濃縮法と熱拡散法は、第二次大戦中の米国の原爆開発・製造計画であるマンハッタン計画の時代に実用化されたものである。

【参考文献】

- [1]三島良績（編著）：核燃料工学、同文書院（昭和47年10月）
- [2]火力原子力発電協会（編）：原子燃料サイクルと廃棄物処理、昭和61年6月
- [3]火力原子力発電協会（編）：やさしい原子力発電、平成2年6月
- [4]原子力百科事典 ATOMICA
- [5]日本原子力学会（編）：原子力がひらく世紀、2004年3月
- [6]テキスト「核燃料サイクル」編集委員会（編）：
テキスト「核燃料サイクル」、日本原子力学会、再処理・リサイクル部会（2015年6月）、第3章 ウラン濃縮
<http://www.aes.j.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html>

II-1-2 使用済燃料の中間貯蔵の方式を3つ以上挙げ、その概要、長所、短所を述べよ。

【解答のポイント】

使用済燃料中間貯蔵として国内で実用化されているプール貯蔵及び金属キャスク貯蔵の2つについては回答しやすいと考えられる。しかし、問題では3つ以上の貯蔵方式の記述が求められており、国内で実用化されている技術だけでなく、その他の研究内容や海外動向についても把握しておくことが望ましい。なお、この問題における答案用紙は1枚のみであるため、3つの貯蔵方法の概要、長所、短所を端的に記述するだけでも紙面は埋まってしまう。従って、以下の貯蔵方式のうち、3つの貯蔵方式を答案に記載することで解答としては十分と考える。

① プール貯蔵方式

【概要】使用済燃料をプール水中に設置されたラックに収納して貯蔵する方式である。プール水により使用済燃料の崩壊熱を除去すると共に、使用済燃料からの放射線を遮蔽する。

【長所】除熱性能に優れているため、原子力発電所等における大容量の貯蔵及び原子炉から取り出して間もない発熱量の高い使用済燃料の貯蔵も可能である。

【短所】冷却水の循環による強制冷却を行うため、冷却水及び電源の管理による運転・維持コストが発生する。また、貯蔵体数を増やすためにはラック改造を伴う大掛かりな工事が必要となる。

② 金属キャスク貯蔵方式

【概要】使用済燃料等の輸送に使用してきた衝撃や火災などに耐えうる堅牢な金属製の容器(キャスク)に収納して貯蔵する方式である。金属キャスク自身が閉じ込め、遮蔽、臨界防止及び除熱の4つの安全機能を有している。なお、除熱は自然空冷である。

【長所】必要な貯蔵体数に応じたキャスク基数だけ用意すればよいため、貯蔵開始時の初期投資が抑えられる。貯蔵体数を増やす必要が生じて、必要な数だけキャスクを適宜増設すればよく、柔軟な対応がしやすい。また、貯蔵後は定期的な監視は必要であるものの、基本的にはメンテナンスフリーである。

【短所】キャスクに貯蔵する際、キャスクの安全設計においては使用済燃料は原子炉から取り出して数年程度は冷却されている前提であるため、キャスク貯蔵する前には使用済燃料をプールで数年程度は冷却する必要がある。

③ コンクリートキャスク貯蔵方式

【概要】使用済燃料を収納したキャニスタ(ステンレス鋼製の円筒状の密封容器)をコンクリート製の遮蔽構造物内に貯蔵する方式である。この構造物には給排気口があり、空気の循環により自然空冷される。

【長所】金属キャスクに比べると簡素な構造であり、コストの観点で有利である。

【短所】国内における貯蔵立地は海岸近くになる可能性が高く、その際には冷却空気中に海塩粒子が含まれる。貯蔵建屋で塩分流入対策を施さない場合にはキャニスタに応力腐食割れが発生する可能性があり、この課題解決のために研究開発が必要である。

④ ボールト貯蔵方式

【概要】コンクリート製の大きな空洞(空間)に収納管を垂直に並べ、その中に使用済燃料を詰めたキャニスタを入れて貯蔵する方式である。なお、除熱は自然空冷である。

【長所】収納管をできるだけ高密度に配置することで貯蔵効率を高めることができ、大容量の貯蔵に適している。

【短所】上記のとおり貯蔵密度が高いため、除熱性能が重要となり、冷却方法に工夫が必要となる。冷却に関してはヒートパイプ方式による強制冷却の開発が進められている。

なお、近年の核燃料サイクル（及び放射性廃棄物の処理・処分）における試験問題では、使用済燃料や放射性廃棄物の貯蔵・保管に関しての

出題が多いため、試験対策として参考文献[1]及び[2]のサイクル関係の項目・資料は一通り把握、理解しておくことを勧める。

【参考文献】

- [1] 原子力百科事典 ATOMICA 「使用済燃料中間貯蔵技術(06-01-05-14)」
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_06-01-05-14.html
- [2] テキスト「核燃料サイクル」編集委員会(編)：
 テキスト「核燃料サイクル」, 日本原子力学会, 再処理・リサイクル部会 (2015年6月)、第5章 使用済み燃料貯蔵
<http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html>
- [3] 電力中央研究所(2014)「使用済核燃料貯蔵の基礎」、株式会社ERC出版
- [4] 内閣府原子力委員会(2020)「令和元年度原子力白書」、2-2 国内外の原子力のエネルギー利用を取り巻く環境変化への対応
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2020/2-2.pdf>
- [5] 電気事業連合会(2020)「使用済燃料貯蔵対策への対応状況について」
https://www.fepc.or.jp/about_us/pr/oshirase/_icsFiles/afiedfile/2020/07/13/press_3_20200702.pdf

II-1-3 使用済燃料の再処理でのトリチウムの工程内挙動と環境への放出について述べよ。

【解答のポイント】

(1) トリチウムの発生について

トリチウムは、原子力発電所の燃料中で三体核分裂により発生するもの、冷却水中のホウ素成分の核反応や重水素の中性子吸収などによって発生するこのように発生したトリチウムが使用済燃料として再処理施設で処理される。

(2) トリチウムの工程内挙動について

再処理施設に持ち込まれて使用済燃料はせん断処理工程と溶解工程で硝酸に溶解される。この際に使用済燃料や燃料被覆管に含まれるトリチウムが溶解液の中に溶解される。これらのトリチウムを特定の工程内に留めるために、第1酸回収工程(HTAR; High Tritated Acid Recovery)や第2酸回収工程(LTAR; Low Tritated Acid Recovery)が設けられている。分離係数が低いため酸回収工程で高い除染能力は高いため、後段への移行を抑えることができる。これにより、脱硝工程へのトリチウムの移行を抑制することができる。また、第一酸回収工程で回収された酸は溶解工程で再利用される。その他の液体廃棄物は低レベル廃液処理されて、海洋放出される。その他、各建屋から出てくる気体廃棄物は排ガス処理されて、大気放出される。

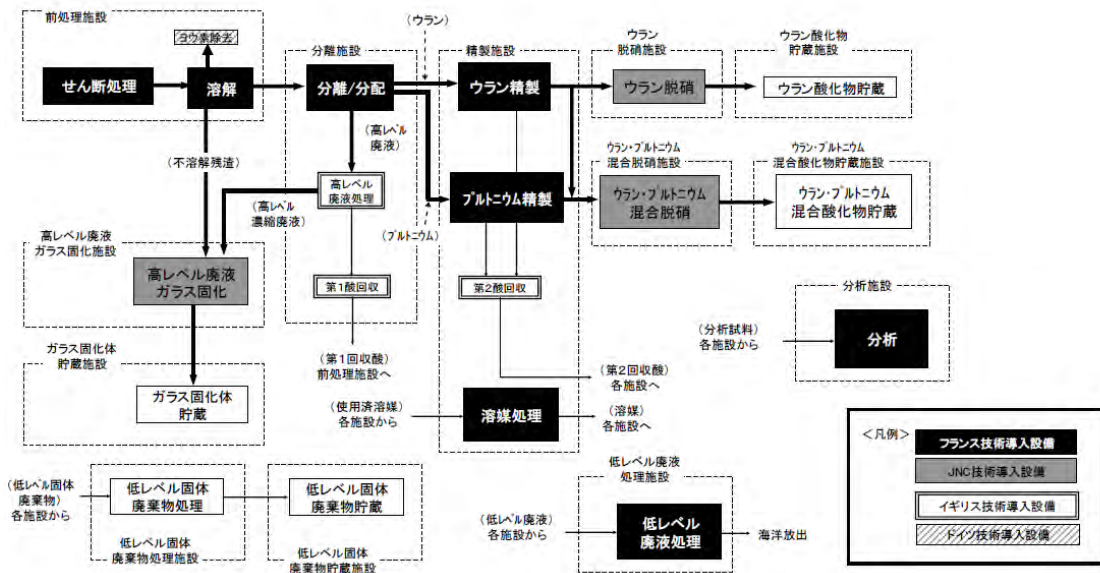


図 六ヶ所再処理工場の施設構成^[2]

(3) トリチウムの環境への放出について

トリチウムは、環境での拡散効果が大きく、周辺環境への蓄積が小さいとともに、生体に対する濃縮効果が少ない。このため、六ヶ所再処理施設では、モニタリングをしながら、主に海洋放出しており、その約1/10を大気放出する許可申請となっている。これらは、十分な拡散効果を持つ海洋放出管の海洋放出口からの放出と主排気筒などから放出することによって、公衆の線量の低減化を図っている。

東海再処理施設でトリチウムの収支について調査が行われたことがあり、その収支が報告されている。オフガス系へ移行するもの、廃液系へ移行するものについては、分析が行われて収支が確認されている。一方で、燃料被覆管の材料にジルカロイが用いられている関係で水素がジルコニウムと水素化合物を形成して被覆管中に溶け込むことが分かっている。

廃液系、オフガス系に移行する量の調査結果から、約5～6割は、ハル（被覆管せん断片）中に残存すると考えられており、残りの大半は海洋放出され、一部が工程内に残存する。この他、大気放出されるものもあるが、その量は、前述のものに比較すると、全体の1～2%程度であり、極わずかである。また、別の調査において、東海再処理施設の排気筒から大気放出されるトリチウムの化学形態の調査が行われており、ここでは、放出されるトリチウムの化学形態は2～3割程度が水素ガス状トリチウム（HT）、残りのほとんどが水分状トリチウム（HTO）であったとされている。

水分上のトリチウムは化学的な性状は水の動きと同様であり、廃液処理などで取り除くことは難しいが、再処理施設の許認可において、それによる環境影響が評価され、その値を超えないように放出管理が行われている。

本間に関連して、トリチウムについては、福島第一原子力発電所から発生する汚染水（トリチウムが含まれる）の処理問題の中で議論されていることから、その基本的な性状や考えられる処理技術など、合わせて確認しておくことをお勧めする。

【参考文献】

[1] Claude Bernard et al., “ADVANCED PUREX PROCESS FOR THE NEW REPROCESSING PUNTS IN FRANCE AND IN JAPAN”, CEA-CONF-10559 (1991.4)

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/018/23018577.pdf

[2] テキスト「核燃料サイクル」編集委員会（編）：

テキスト「核燃料サイクル」, 日本原子力学会, 再処理・リサイクル部会 (2015年6月)、第6章 核燃料再処理

<http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html>

[3] 六ヶ所再処理事業変更許可申請書

<https://www.nsr.go.jp/data/000309776.pdf>

[4] 山之内種彦ら、“再処理工場におけるトリチウムの挙動”, TN841-81-37 (1981.3)

[5] 三上智ら、“使用済燃料の再処理に伴うトリチウムの化学形及び排気・廃水への移行割合”; JNC-TN8410-2002-005 (2002.3)

[6] 大森栄一ら、“東海再処理施設の安全性確認に係る基本データの確認”; JNC TN8410 99-002 (1999.2)

[7] 原子力百科事典ATOMICA 再処理施設からの放射線（能）(09-01-02-06)

[8] トリチウム水タスクフォース、“トリチウム水タスクフォース報告書” (2016.6)

II-1-4 ウラン廃棄物の埋設処分に関する現状と課題について述べよ。

【解答のポイント】

(1) ウラン廃棄物について

ウラン廃棄物とは、低レベル廃棄物（TRU 廃棄物、発電所廃棄物、ウラン廃棄物、研究施設等廃棄物）の一種で、ウラン濃縮施設、ウラン燃料加工施設から発生する放射性廃棄物である。ウラン廃棄物に含まれる放射性物質の主な組成は自然起源のものであり、自然環境中にも存在するもので、数十年から数百年の期間における放射能の減衰は見込めず、子孫核種が生成し放射能が増える（ビルドアップ）などの特徴を有している^[1]。

ウラン廃棄物の処分は放射能濃度などに応じて規制されており、U-234、U-235、U-238 に対してそれぞれ 1Bq/g 以下の金属くずは原子炉等規制法の対象から外す（クリアランスする）ことができ、それ以外については埋設することとなっている^[2]。

(2) ウラン廃棄物の埋設処分に関する現状について

民間のウラン燃料成型加工施設及び日本原燃(株)のウラン濃縮施設から発生するウラン廃棄物については、各事業所において保管されている。2016年3月末で、民間のウラン燃料成型加工事業者等においては、200リットルドラム缶換算で、約44000本、日本原燃(株)においては約7800本、原子力機構においては約600本が保管されている^[3]。クリアランスされないウラン廃棄物については埋設処分することとなっている。しかし、ウラン廃棄物の第二種廃棄物埋設（放射能レベルの比較的低いものを処分するピット処分、放射能レベルの極めて低いものを処分するトレンチ処分）について、原子力安全委員会が平成22年に策定した第二種廃棄物埋設事業の安全審査の基本的考え方^[4]の中で、「ウラン系列核種が主な核種となるいわゆるウラン廃棄物については、天然起源の放射性物質を主たる組成とする放射性廃棄物であり、長期にわたり放射能の減衰が期待できず、かつ、安全性の判断に当たり自然環境中の放射能との関連等も考慮する必要があると考えられる」とし、適用対象外とされており、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則の令和元年12月5日の改訂においても、ウラン廃棄物は対象から除外されており、規則が制定されていない。このため、ウラン廃棄物の埋設に関する規制基準等の整備するための検討が進め

られている。

ウラン廃棄物の埋設処分の検討では、ウランは自然界にも存在しており、場所によってその存在量も違いが生じるため、娘核種のラドンの吸入、食物からの摂取、大地からの外部被ばくなど自然環境中でのウランの挙動の特徴踏まえたバックグラウンドを考慮することを難しくしている。また、ウランの主要核種はすべて α 崩壊核種であり、U-235に同伴する186 keV γ 線等を利用して、ある程度の精度の範囲で測定可能であるが、ウラン廃棄物は放射平衡に到達していないことや同位体組成がそれぞれ違うことから、検出及び定量を難しくしている。さらに、埋設による被ばく評価において、地下水による移行や埋設地の直上への居住等の経路を想定し、評価するが、ラドンは希ガスであり、その挙動及び被ばくへの寄与は他の子孫核種とは異なる。ラドンはガス状態で地中から地表へ放出された場合にのみ人への被ばくに寄与することになり、地中にとどまる場合には、被ばくへの寄与は極めて小さい。そのため、ラドンによる被ばくを評価するには特別のモデルが必要となる。ラドンによる被ばくを評価した例があるが、地中から地表へのラドンガスの散逸、床下等から家屋内へのラドンの侵入、家屋内と家屋外との換気といった評価が必要であり、評価の不確かさが大きい。

(3) ウラン廃棄物の埋設処分に関する課題について

各発生事業者で安全に保管されているものの、保管能力や将来の廃止措置等の関係から、適切な時期に埋設することが検討されている^[5]。しかし、ウラン廃棄物の埋設に関する規制基準等が決まっておらず、規則が制定されていない状態であるため、これを整備することが課題である^[5,6]。しかし、ウラン廃棄物はビルドアップなどがあるため、その他の放射性核種で用いている従来の処分や原子炉等規制法の対象から外すクリアランスの規定基準をそのまま適用することについてはできず、十分な検討が必要となる^[1]。

諸外国においては、ウランを含有する放射性廃棄物の処分実績はあるものの、ウラン廃棄物という廃棄物の分類がないため、ウラン廃棄物に特化した濃度上限値等の規制・基準がないため、論点を整理して、国際的に適用できる制度とすることが課題となる。ウランを特別視せず長寿命核種のひとつとして捉えているものと考えられ、IAEA 個別安全指針SSG-29「放射性廃棄物の浅地中処分施設」においては、限られた量の長寿命放射性核種を含む場合のみ浅地中処分が適しているとされている。このことから、埋設当初からウラン濃度を十分に低い放射能濃度に抑えることによって公衆の被ばくを低減することが可能であることから、浅地中処分の対象とすることが適当であると考えられる。さらに、天然に存在する放射性核種の埋設に当たっては、IAEA 個別安全要件SSR-5「放射性廃棄物の処分」では、線量基準に代わる付加的指標として、自然のウラン濃度を基準として比較することは有効であるとしている。このことから、埋設当初から廃棄物埋設地のウランの平均放射能濃度を1Bq/g程度以下に抑えることによって、ビルドアップ効果を含めてもウラン廃棄物を現行の浅地中処分の枠組みで取り扱うことができると考えられる^[2]。

廃棄物埋設地において局所的にウラン濃度が極端に高い場所、平均放射能濃度を1Bq/g程度以下の前提と乖離する可能性があるため、廃棄物埋設地においてウラン濃度が著しく高い領域がないように埋設することが求められ、埋設しようとするウラン廃棄物とそれ以外の放射性廃棄物との割合や廃棄物埋設地を埋め戻す際の土砂等の量を考慮し、埋設する放射性廃棄物のウラン濃度の制限等に対応することが課題となる^[2]。

上記示したように、ウランの平均放射能濃度が1Bq/g程度以下であれば、現行の浅地中処分（ピット処分、トレンチ処分）の枠組みで取り扱うことができると考え、検討が進められているが、放射能が高いウラン廃棄物に関しては、中深度処分が必要となる。しかし、中深度処分については現行の枠組みがないことから、これらに関する規制の整備も課題となる^[7]。このためには、自然界に存在するウランのバックグラウンドの取り扱い、ウランの検出・定量、さらに娘核種のラドンによる被ばくを評価するには特別のモデルを構築することが課題となる。

また、ウラン廃棄物の埋設処分の課題として、廃棄物量の低減がある。これを解決する方法の一環として、燃料として用いる濃縮ウラン燃料の使用とともに必然的に増える劣化ウランの活用することが課題となる。利用方法としてはウランの特徴を発揮できる分野で用いられることが考えられ、金属ウランの特徴を以下に示す^[8]。

- ・密度が高い（鉛の1.7倍）
- ・ γ 線、X線の遮へい性能に優れている（鉛より2桁高い遮へい効果）
- ・融点が比較的高い（1132℃）
- ・機械的強度が大きい
- ・加工しやすい
- ・熱伝導率がやや低い（25W/m・K）

活用用途としては、一般産業と原子力産業とが考えられ、その一例を以下に示す。一般産業での利用の場合は、化学毒性、内部被ばくや核燃料物質としての規制を受けることが課題となる。

(a) 一般産業

- ・高密度特性に着目した利用
 - 航空機などのバランスー
 - 高慣性ローター
- ・ γ 線、X線の遮へい性能に着目した利用
 - RI 運搬容器および放射線医療機器の遮へい
 - 加速器のコリメータおよび遮へい
- ・化学的性質に着目した利用

-機能材料、ガスの純化、染料・顔料

-水素吸蔵合金

(b) 原子力産業

- ・軽水炉プルサーマル燃料としての Pu との混合酸化物燃料
- ・高速炉のブランケット燃料
- ・軽水炉、CANDU 炉燃料棒の一部
- ・軍用高濃度ウランを軽水炉燃料用低濃縮ウランに希釈するための希釈原料
- ・低濃度ウラン製造のための再濃縮原料

【参考文献】

- [1] 令和元年度版原子力白書、原子力委員会、令和2年8月
- [2] ウラン廃棄物のクリアランス及び埋設の規制に関する検討（第3回）、原子力規制庁 資料2、令和2年12月16日
<https://www.nsr.go.jp/data/000337553.pdf>
- [3] 平成28年度版原子力白書、原子力委員会、平成29年9月
- [4] 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方、原子力安全委員会、平成22年8月9日
- [5] 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、日本原燃株式会社ら、平成18年3月
- [6] ウラン廃棄物等の諸課題について、山名ら、原子力学会誌、Vol.50、No.3（2008）
- [7] 低レベル放射性廃棄物処分におけるウランの扱いについて—浅地中トレンチ処分に係る規制への提言—、日本原子力学会「東京電力福島第一原子力発電所事故以降の低レベル放射性廃棄物処理処分の在り方」特別専門委員会、平成27年3月
- [8] 原子力百科事典 ATOMICA, 劣化ウランとその利用(04-02-01-11)
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_04-02-01-11.html

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 放射性物質を含む水溶液(汚染水)を効果的に処理することを目的として、放射性物質の吸着材を開発することとなった。あなたは、ホット試験を含むこの研究開発の実施チームのリーダーとして吸着材の性能評価を行う。下記の内容について記述せよ。なお、この研究成果を踏まえて、次の段階では装置の基本設計を行う計画である。

- (1) 調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (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】

(1) 調査、検討すべき事項とその内容について

放射性物質を含む水溶液(汚染水)の処理については、福島第一原子力発電所の事故以前から、例えばTMI-2の事故後の水の処理や、欧米の原子力施設の水の処理などのために、開発が進められてきた。ここでは、福島第一原子力発電所の汚染水のための吸着材開発を進めることを主に想定する。

まず、処理対象である汚染水の量や処理対象核種について確認することが重要である。

福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉内には、事故により溶けて固まった燃料(燃料デブリ)が残っている。発熱する燃料デブリを冷却するために、外部から注水を続けており、この水が燃料デブリに触れることで、高濃度の放射性物質を含んだ「汚染水」が発生する。「汚染水」は原子炉建屋内等に滞留しているため、建屋内等に流れ込んだ地下水や雨水と混ざることによっても「汚染水」が発生する。2020年の1日当たりの汚染水発生量は約140立方メートルと報告されている。

汚染水中にはセシウムやストロンチウムを始めとする様々な放射性核種が存在している。これらの放射性核種を効率よく吸着させるための吸着剤の材料の選定も重要である。現在運転中の多核種除去設備(ALPS)では、前処理工程後の汚染水を、吸着剤を充てんした吸着塔を通水することで、セシウムを含む62種の放射性物質(トリチウムを除く)の除去が可能となっている。

また、装置の使用における吸着剤の交換方法や使用後の吸着剤の保管方法などについても検討が必要である。

(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

処理目標とする放射性核種の濃度の基準として、告示濃度限度がある。告示濃度限度は、人が通常1日に飲む量の水を1年間飲み続けた場合に1mSvとなる濃度である。告示濃度限度は核種ごとに定められており、例えば、セシウム134は60Bq/L、セシウム137は90Bq/Lである。また、排水中に複数の核種が含まれる場合、それぞれの核種の濃度と告示濃度限度の比(告知濃度限度比)の総和が1以下となることが求められることに留意しなければならない。

そのほかの汚染水の特徴として、事故直後に使用した冷却水や津波に由来する海水成分が存在するという点も挙げられる。核種によっては共存イオンが吸着の妨害となる可能性があるため、この点も考慮する必要がある。

上述のように、汚染水処理のための吸着材には、非常に多くの核種を極低濃度まで除去する高い性能が求められる。また、処理が長期間にわたるので、その間に水質変化も考慮する必要がある。核種や水質によって適切な吸着材も異なることが予想されるので、それぞれの状況に応じた試験が必要になる。試験方法にはカラムに吸着材を装填して汚染水を流して評価するカラム式、吸着材と汚染水を容器に入れて評価するバッチ式などがあるが、例えば、通水速度、液固比、浸漬時間などの試験方法や試験条件によって得られる結果が異なるため、これらも十分に把握しておく必要がある。

以上のような留意点を考慮した上で、試験設備の製作・設計、試験環境・条件や判定基準なども含めた試験方法の策定、関係者による試験方法のレビューなどを行い、吸着剤の性能評価実施に向けて業務を進めていく。

(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

放射性核種を吸着する性能以外にも、取り扱い性、価格や入手容易性、使用後の処理方法などについても、基礎試験の段階から念頭に置き、基本設計の担当者との情報共有を進めておくことが望ましい。

また、汚染水から放射性物質を極力除去するための処理方法、研究の進捗状況、最終的に残る処理水の性状や最終的な処理の扱いなどについて、国・地方自治体、地元の住民の方々といったステークホルダーとも情報を共有し、地道に合意形成を図っていく取組みも重要である。

【参考文献】

[1] 東京電力ホールディングスホームページ汚染水処理ポータルサイト

<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/>

[2] 経済産業省ホームページ 東京電力資料 至近の多核種除去設備等処理水の性状について

www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/takakusyu/pdf/017_00_04.pdf

[3] 日本原子力学会バックエンド部会ホームページ 福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ収集

II-2-2 核燃料サイクル施設の安全性向上対策の一環として、計算機プログラムを用いて施設の安全性を解析評価する。あなたは、解析評価チームのリーダーとして、この解析業務を進める。解析業務の一部はアウトソースする予定である。下記の内容について記述せよ。なお、この評価結果を元に次の段階では対策工事の設計を行う計画である。

- (1) 調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (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】

問題文に記載されているこの業務の前提条件（以下の事項）を踏まえて、各設問への対応を考える必要がある。以下の前提条件の中では、個別にどのような解析を行うかが記載されていないが、安全性向上対策とあるので、本解題においては、規制基準を満足している状態から、更なる向上策を検討する段階にあることを想定して解説する。

- 核燃料サイクル施設の安全性向上対策の一環の解析評価であること
- 計算機プログラムを用いて施設の安全性を解析評価すること
- 解析業務の一部をアウトソースすること

(1) 調査、検討すべき事項とその内容について

まず、「安全性向上対策」を行う際に考慮しなければならないのは、現状のリスクである。当該施設の現状に関し、様々なリスクに係る情報を収集、整理する必要がある。

- それまでに実施してきた安全性確保のための対策の状況
- 当該施設の放射性物質保有量及びその場所、安全評価の状況、安全裕度の程度
- 不確実性や事故発生時の影響など

について、設計側との意見交換を密に行うことで、どの程度把握できているかを確認し、業務の進め方について検討する必要がある。この際、どのような箇所や対策について改善の余地があるのか、様々なリスクについて全体的に俯瞰し、また、最新の規制要求に照らした上で全体として最適な対策が選定できるよう配慮したいところである。

一面だけを見て対策を選択することになると別の側面から見ると反って安全性を後退させるような場合も想定しうるためである。自らの業務経験に照らし、解析評価への影響について例示を加えて説明できると説得力がある。例えば、

- ・ 「地震対策などで頑強な構造とする」、「予備系を追加する」等した時に、重要な設備機器へのアクセスルートが制限されアクセスできなくなるリスクが高まる
- ・ 火災が発生した場合に備え「消火水ライン」を追加して、他のエリアで溢水のリスクが高まる等

また、本問で、一部の解析業務をアウトソースすることを前提としているが、アウトソースすることにより、外部への委託に係る費用が発生する。当然、アウトソースする内容や範囲についての検討が必要になる。自社において、信頼できる解析プログラム、そのオペレータが既にある場合には、その項目に関してはアウトソースするか否かを含めて検討する必要がある。また、解析評価したい項目に関する解析プログラムが社内で使用できない状況にある場合は、①その項目に関する解析コードを入手し自ら計算を行うか、②解析業務そのものを役務としてアウトソースするかについても選択となる。必要なコスト、力量などを勘案してアウトソースの計画を行う必要がある。

また、状況によっては、アウトソース前に、解析コード（プログラム）によらず、簡易モデルを用いた計算により、概略の結果について予想することが望ましいケースもある。関連する情報を整理し、調達計画、要求事項を検討する必要がある。

(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

解析評価を行う項目や対象、アウトソースする範囲について、大よそのスコープを特定し、業務の方向性、基本方針を決定したら、業務の進め方、プロセスについて検討する必要がある。業務手順を定める際には、安全対策工事完了までの時期、必要となる資源などの制約、解析評価による結果の見通しや合理化の可能性などを勘案する必要がある。

業務を進める手順として、（一社）原子力安全推進協会から出されている解析業務の品質向上ガイドラインが参考になる。ガイドラインの業務フローチャートによれば、以下の流れで業務を進めることになる。

【発注者（事業者）】

- 1) 調達文書作成
- 2) 解析業務発注
- 3) 受注者に対する解析業務実施状況の確認
 - ・ 業務計画書等の整備状況、実施状況
 - ・ 計算機プログラムの検証状況

- ・入力根拠の作成状況
- ・入力結果の確認状況
- ・解析結果の検証状況（審査の実施状況、デザインレビュー等の実施状況を含む）
- ・業務報告書の確認状況
- ・変更管理の状況

4) 許認可申請等

なお、上記の確認項目から分かるように、ここでは計算機プログラムの検証、入力根拠の作成、解析結果の検証などが受注者にアウトソースされている。

受注者に解析業務を委託する場合を含め、解析業務の実施にあたっては、信頼性の確保が重要なポイントになるので、その点に留意が必要になる。

① 解析プログラムの信頼性の確保について

解析業務においては、解析プログラムの信頼性確保が大前提となる。

- ・ 既存のプログラムがある場合には、そのプログラムの許認可申請への使用実績の確認や、使用実績のある解析プログラムの比較による検証などが方法として考えられる。
- ・ 解析プログラムの使用実績がない場合或いは解析プログラムの開発が必要な場合には、実機運転データとの比較、大型実験又はベンチマーク試験との比較を行い、信頼性を確認する。

② パラメータの設定の妥当性及び入力データの信頼性の確保について

入力データやパラメータの設定など解析を行う上で、入力、設定が必要となる事項については、その入力根拠を明確にし、文書化しておく。解析結果が疑わしい場合の再現解析や、解析結果によって安全性向上対策の実施内容に大きく影響を及ぼす場合の条件設定の変更など、後の方針決定や対策の合理化等に役立てる上でも重要となる。1回の解析プログラムによる計算に費用を要する場合などは、簡易モデルによる解析を行うなどして、慎重にパラメータを選定する。また、設定したパラメータや入力データは、後の許認可申請時にエビデンスとして提示を求められる場合があるため、事業者の規則に従い記録として保管する。

③ アウトソースの内容と内部実施内容の整合性の確認

解析業務の一部をアウトソースする場合、一連の解析を行う場合には、データの授受の際に相互に確認することや、責任の分界点を明確にしておくことなど配慮する必要がある。後に解析の誤りや不整合などが確認された場合に適確に対応できるようにするためである。

併行して進める場合においては、双方の解析の信頼性や正確さなどを勘案して、安全対策内容に係る意思決定を行うことになると思われるため、可能であれば、用いる解析プログラムや入力モデルなどを予め、調整しておくことが望ましい。

(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針について

本件で想定される組織内部の関係者と調整事項としては、

- ・ 設備の現状に関する情報収集を含む、実態に即した対応とするための安全性向上対策案の検討に係る調整
- ・ 解析から安全性向上対策実施に係る予算の見積、予算確保の調整
- ・ 解析の進め方や安全性向上対策の内容について意思決定に係る調整
- ・ 予算管理や工事管理を行う部署など
- ・ また、外部との調整事項としては、
- ・ 規制当局への説明、情報提供、審査対応など
- ・ 地域の理解を得るための地元自治体や住民の方々ほかステークホルダーへの事前説明、意見聴取などが考えられる。

いずれも、対策の方針の提示の必要性や追加の安全性対策の可能性などを考慮して、早い段階から説明して理解を得ておくことが、円滑な業務遂行につながるものと考えられる。

【参考文献】

- [1] 日本原子力学会 標準委員会、“継続的な安全性向上対策採用の考え方について”（2017.12）
- [2] （一社）原子力安全推進協会“原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン”（2014.3）
- [3] 技術士ハンドブック第8章プロジェクトマネジメント

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 実効線量などの防護量は直接には測れないので、測定には実用量が用いられる。その内容と問題点について、専門技術を踏まえた考えを示せ。

【解答のポイント】

放射線をモニタリングする際に重要な実用量について、各専門の立場からの理解度を問う問題である。ここでは、定義と想定条件、ICRUでの課題の概要をまとめる。

サーベイメーターや個人線量計は、その検出量から放射線の基本物理量(フルエンス、自由空気中の空気カーマ、又は組織吸収線量)を導出し、実用量に校正された値を表示する。理論的には、この基本物理量から防護量(実効線量等)を計算することは可能であるが、時間・空間的に変化する照射条件を常に把握し、指示値として表示することは難しい。そこで、測定される基本物理量に対応し、防護量を常に下回らない値として実用量が定義され、検出器の値付け(校正)に用いられている。現在の実用量としては、場のモニタリングの「周辺線量当量(ambient dose equivalent)」と「方向性線量当量(directional dose equivalent)」及び、個人モニタリングの「個人線量当量(individual dose equivalent)」がある。^{[1]~[4]}

1) 周辺線量当量 $H^*(d)$

「放射線場のある1点における周辺線量当量 $H^*(d)$ は、それに対応する拡張・整列した場(一方向からくるとして整列させた場)に置かれたICRU球(直径30 cm、元素組成O:76.2%、C:11.1%、H:10.1%、N:2.6%、密度:1 g/cm³)中の整列場方向に対向する半径上の球表面から深さdの点の線量当量である。」とICRU Report 51で定義されている。^[4] γ 線や中性子などの強透過性放射線に対してはd=10 mmで、様々な照射条件での実効線量を下回らない値となる。また、 β 線や低エネルギーX線などの低透過性放射線に対しては、皮膚ではd=0.07 mm、目の水晶体ではd=3 mmで、それぞれ皮膚と目の水晶体の等価線量を下回らない値を示す。測定器をこれら $H^*(d)$ に値付け(校正)することで、防護量を下回らない場のモニタリングが可能となる。なお、周辺線量当量 $H^*(d)$ の測定では、拡張・整列した場を仮定していることから、無指向性でかつ $H^*(d)$ のエネルギー応答を持つ放射線測定器が必要となる。

2) 方向性線量当量

β 線や低エネルギーX線の測定器は、通常、方向特性を有しており、その方向特性と作業者の被ばく線量との関連性を考慮し作られた実用量が方向性線量当量である。ICRU Report 51では、「放射線場のある1点における方向性線量当量 $H'(d, \Omega)$ は、それに対応する拡張場に置かれたICRU球中のある指定された方向 Ω の半径上の球表面から深さdの点の線量当量である。」と定義されている。弱透過性放射線の被ばくが問題となる人体組織は皮膚と眼の水晶体であるが、これらの組織に後方から入射する放射線の被ばくは人体の遮蔽効果により無視できることから、方向依存性のある既存検出器でも測定可能である。ただし、放射線防護上、全立体角方向で線量(率)が最大となる方向の値を、被ばく線量の予測に用いることが望ましい。

3) 個人線量当量 $H_p(d)$

個人モニタリングに用いられる個人線量当量 $H_p(d)$ は、放射線場での作業者の被ばく線量とその作業者の人体表面に装着された個人線量計の関係を考慮し作られた実用量であり、「身体上の特定された点の深さd点における軟組織中の線量当量」と定義される。dの値は、強透過性放射線に対してd=10 mm、弱透過性放射線に対して皮膚ではd=0.07 mm、眼の水晶体ではd=3 mmの線量当量が推奨される。個人線量当量は、定義からは「身体上の特定された点」での線量であることから取付位置で変わる値であるが、個人の線量当量の計算や個人線量計の校正のために統一された基準の線量当量値が必要である。そのため、個人線量計の校正では、スラブファントム(30 cm×30 cm×15 cm、密度:1 g/cm³)を用い、中央面を平行ビームで面垂直に照射し、ファントム中央面下の各深さでの線量当量を用いる。なお、1個の個人線量計で被ばく管理を行う場合、作業空間全体の放射線場のフルエンス等の物理量は均一であることが必要である。均一でない場合は、不均等被ばくとして複数の個人線量計の装着が必要となる。特に、手、前腕部及び足とくるぶしなどの被ばくは「末端部被ばく」といい、その部分に被ばくの恐れがある場合は、体幹部に着用する線量計の他に、その部位に専用の線量計を着用する必要がある。^[4]

以上、現在使用されている実用量は、場のモニタリングとしてICRU球内の1点、個人モニタリングに対しては人体組織内の1点の線量当量と定義し、原子力施設やRI施設で対象となるエネルギー範囲(70keV~3MeV)で γ 線や中性子に対しては防護量を下回らない、また、実測可能な値とされている。但し、放射線の種類や高エネルギー放射線に対しては実用量が防護量より下回る場合があり、宇宙船、航空機、高エネルギー加速器施設での放射線防護への適用には、放射線のタイプ(陽子、 μ 粒子、 π 中間子等)と、そのエネルギー範囲の拡張が課題となる。更に、

実測可能とは、検出器の校正場を実用量で値付けすることであるが、高エネルギー放射線等では定義どおりの測定は困難である。一方、ICRP2007年勧告 (ICRP Publ. 103) ではリファレンスファントムを用いた実効線量等の算定方法が推奨されているが、実用量はこれらと異なるファントムから定義されていることから、両者の関連性がわかりにくいという課題もある。

これらの課題に対して、2017年にICRPとICRUは共同で、防護量を基準に、実用量を定める方法を提案している。この実用量は、ICRP Publ. 110の標準人ファントムを用い、様々な照射条件で計算された実効線量 (または眼の水晶体、皮膚の吸収線量) 算出時の基本物理量からの換算係数に対して、その最大値を換算係数として置き換え計算した値である。これにより、従来のICRU球や軟組織の線量当量でなく、実効線量をもとに実用量が関係づけられ、常にどのような放射線のエネルギーや照射条件でも、防護量を過小評価せず、また、過度に過大評価することがないとなっている。^{[5][6]}

【参考文献】

- [1]岩井敏他、外部被ばくの放射線防護における線量概念の変遷と展望 I. 外部被ばくの放射線防護の線量体系、原子力学会誌 Vol. 62, No. 12 (2020)
- [2]西臺武弘、放射線線量測定学、文光堂、2014
- [3]小佐古敏荘編、原子力教科書 放射線安全学、オーム社、2013
- [4]岩井敏他、外部被ばくの放射線防護における線量概念の変遷と展望 III. 実用量の変遷と今後の変更、原子力学会誌 Vol. 62, No. 12 (2020)
- [5]遠藤章、ICRP, ICRUにおける防護量と実用量に関する最新の検討状況、保健物理、52(1)、39~41 (2017)
- [6]Operational Quantities for External Radiation Exposure, Final draft July 2017 (2021時点でICRU Report 95で発行済)

II-1-2 放射線の LET (線エネルギー付与) と RBE (生物学的効果比) を説明するとともに、両者の関係について述べよ。

【解答のポイント】

本問題はこれまでも頻出しており、放射線利用・放射線防護での放射線の影響を理解するうえで必須の項目である。

まず、生物などに対する放射線の影響を調べる場合に、放射線により物質中の原子や分子に局所的に付与するエネルギーが問題となる。この局所的なエネルギー付与をあらわすために、放射線が物質を通過するときに飛跡の単位長さあたりに失うエネルギー量を LET (線エネルギー付与、Linear Energy Transfer) という。この値は、荷電粒子に対して定義されるので、X線・γ線及び中性子線の場合は、物質との相互作用で生じる二次荷電粒子に対して適用される。ここで、飛跡長さ dL において、エネルギー損失が Δ (eV) よりも小さい衝突にもとづく平均エネルギー損失を $-dE_{\Delta}$ とすれば、線エネルギー付与 L_{Δ} は

$$L_{\Delta} = -dE_{\Delta} / dL$$

となる。 Δ (eV) 以上を失う衝突を除くのは、 δ 線など高速の電子線生成により、元の荷電粒子の通路より遠くに離れた位置にエネルギーを付与する成分を除くためである。 $\Delta = \infty$ 、すなわち L_{∞} のときは衝突阻止能に等しい。一般に、放射線のエネルギーが小さいほど、また粒子の質量が大きいほど LET は大きくなる。例えば、Co-60 γ 線及び診断用 250keV の X線の LET はそれぞれ $0.2\text{keV}/\mu\text{m}$ と $2\text{keV}/\mu\text{m}$ で、飛跡に沿って電離をまばらに起こす。これに対して、4MeV の α 線では $110\text{keV}/\mu\text{m}$ となり、 γ 線や X線より飛跡あたり 55~500 倍の高密度で電離を起こす。^{[1]~[5]}

次に、放射線が生物に及ぼす効果は、放射線の種類およびエネルギー (線質と呼ぶ) によって影響の程度が異なる。例えば、 α 線や重粒子線のような高 LET 放射線は、同じ吸収線量の X線や γ 線のような低 LET 放射線に比べ生物学的影響は大きいことが知られている。よって、放射線の線質の違いによる生物学的影響の違いを表す指標として、RBE (生物学的効果比、Relative Biological Effectiveness) が用いられる。RBE は、基準放射線として一般に 200~250keV の X線あるいは Co-60 γ 線を用いて、基準放射線と同じ生物効果を得るのに必要な線量の比として、下記の式で定義される。

$$\text{RBE} = \frac{\text{ある効果を得るのに必要な基準放射線の吸収線量}}{\text{同じ効果を得るのに必要な試験放射線の吸収線量}}$$

LET と RBE の関係は、LET の増加とともに RBE も大きくなるが、 $100\text{keV}/\mu\text{m}$ 付近で最大となり、それ以降 RBE は低下していく。これは、LET が高すぎると、細胞死に必要な DNA 損傷以上の DNA 損傷を発生するので吸収線量あたりの生物効果が逆に減少するためである。このように、RBE は、放射線の線質に依存するが、着目する生物効果や、線量率、温度、酸素分圧などの照射条件も影響する。例えば、同じ線量が照射された場合、一般に、線量率が小さい方が影響は小さい。これは照射中に回復が起こるためと考えられる。この線量率効果は、低 LET 放射線では顕著であるが、高 LET 放射線では小さい。従って、線量率が減少するほど RBE は大きくなる。このように RBE は LET に依存した値であるが、生物効果の種類、また生物効果のエンドポイントをどこにおくかなどにより変化する値である。放射線防護に用いられる放射線荷重係数は、低線量率被ばくした場合の発がんや遺伝性影響に着目し、危険度が過大評価となるよう RBE の最大値に近い値を採用したものと考えられる。^{[3]~[6]}

【参考文献】

- [1]辻本忠・草間朋子、放射線防護の基礎 第3版、オーム社、2001

- [2] 永原照明、基礎原子力講座 6 新版保健物理、コロナ社、1999
- [3] 柴田徳思編、放射線概論第 11 版、通商産業研究社、2018
- [4] 小松賢志、現代人のための放射線生物学、京都大学学術出版社、2017
- [5] 原子力百科事典 ATOMICA、線エネルギー付与 (LET) ・生物学的効果比 (RBE) ・放射線荷重係数 (WR) (09-02-02-11)
- [6] 原子力百科事典 ATOMICA、放射線の種類と生物学的効果(09-02-02-15)

II-1-3 農業分野で実用化されている放射線利用技術を 3 つ挙げてそれぞれの目的と特徴を説明するとともに、国内外での実施状況について述べよ。

【解答のポイント】

農業分野での放射線利用として、良く知られているものに、「食品照射」、「害虫駆除」、「放射線育種」がある。ここでは、これらの放射線利用技術の目的、特徴と国内外での状況について、概説する。

(1) 食品照射

食品や農産物にガンマ線や電子線などの電離放射線を照射することによって、発芽防止、熟度遅延、殺菌、殺虫などの効果が得られ、食品の保存期間が延長される。このような放射線の作用を利用した食品保存技術は「食品照射」と呼ばれている。

- ・ 馬鈴薯、玉葱、ニンニク、ショウガ他への照射により発芽を抑制
- ・ 穀類、豆類、生鮮果実、乾燥果実への照射により殺虫及び害虫を不妊化
- ・ 熱帯果実、野菜他への照射により熟度を調整。

食品照射は中国、米国などの海外諸国で様々な農産物について実施されているが、日本では、ジャガイモの芽止めのみが認められている。

(2) 害虫防除 (不妊虫放飼法)

ウリミバエのような幼虫がウリ類などの果実の内部を食い荒らす害虫駆除を目的とする。対象害虫の雄を人工的に大量増殖し、羽化 2-3 日前に 70Gy のガンマ線を照射して不妊化したのちに野外に放飼する。この不妊化した雄の成虫は、正常な雌の成虫と交尾することはできるが、受精させることはできなくなる。このような不妊処理を施した雄の成虫を自然界の害虫集団に継続的に大量に放飼すると、雌が受精能力のある雄と交尾する機会が少なくなり、受精卵を産む割合が減ってゆくの最終的に害虫集団は絶滅する。

害虫駆除の例としては、沖縄県のウリミバエの駆除例のほか、アメリカテキサス州やアフリカでラセンウジバエの根絶を目指した対応が行われた例、切り花の殺虫に利用された例などがある。

(3) 品種改良 (放射線育種)

放射線照射による突然変異を利用して耐病性、耐環境ストレス性が高いなどの優良な特性を有する新品種を開発することを目的とする。細胞への放射線照射によって遺伝情報を保持するデオキシリボ核酸 (DNA) の断鎖や塩基損傷が生じる。一般的には一本断鎖は比較的正確に修復される確率が高く、一方二本断鎖や塩基損傷では DNA の変質、修正エラーによる遺伝情報の修正不能が生じ易い。そのため二本断鎖や塩基損傷によって稔性 (有性生殖によって結実し種子を生じること) 低下や奇形的或いは増殖能力を失う致死変異が生じる反面、有用な突然変異が生じることも知られている。このような突然変異で生成した DNA を自家受粉等によって分離選抜して育成し新品種を開発する。品種改良には、γ線やイオンビームが用いられている。

日本、中国、インド、ドイツ、アメリカなどの各国で、稲、小麦などのほか、観賞用の植物に対しても品種改良が行われている。

なお、上記の他、RI を用いて、植物中の物質の動態を調べる研究が行われており、これに触れる答案構成も考えられる。

【参考文献】

- [1] 日本原子力学会、“原子力が開く世紀 (第 3 版)” (2011. 3)
- [2] 工藤久明、“原子力教科書「放射線利用」” (2011. 2)
- [3] 原子力百科事典 ATOMICA「放射線利用の新たな展開について (10-02-02-04)」

【類似問題】

- [1] 平成 30 年度試験問題「放射線利用」(II-1-4)
- [2] 平成 29 年度試験問題「放射線利用」(II-1-2)

II-1-4 考古学や文学財科学などの分野で用いられている放射性炭素年代測定法の原理及び放射性炭素を計測する複数の手法について述べよ。

【解答のポイント】

(1) 放射性炭素年代測定法の原理を説明する。

空気中の炭酸ガスには安定な炭素 ^{12}C のほか、宇宙線が窒素に衝突して生成する放射性炭素 ^{14}C が含まれる。環境における炭素 ^{12}C と炭素 ^{14}C の存在割合は一定であり、動植物が生きて代謝を行っている間、動植物中の炭素 ^{12}C 、炭素 ^{14}C 比も一定に維持される。しかし、動植物が新陳代謝を停止すると環境との炭素の出入りがなくなり、放射性炭素 ^{14}C が半減期（5730年）に従って減少するため炭素 ^{12}C との比が変動する。年代を特定したい試料に含まれる安定炭素 ^{12}C と放射性炭素 ^{14}C の比率を分析して炭素 ^{14}C の半減期から、試料が生命活動を停止した年代を決定することができる。^[1]

(2) 放射性炭素を計測する複数の手法を挙げる。

放射性炭素 ^{14}C を測定する手法として、ベータ線計測法と加速器質量分析法がある。ベータ線計測法は、液体シンチレーション計数装置等を用いて炭素 ^{14}C が放出するベータ線を測定し、安定炭素 ^{12}C との比放射能を求める手法である。加速器質量分析法は、加速器により炭素 ^{14}C イオンを高エネルギーに加速して物質通過中のエネルギー損失から、炭素 ^{14}C の個数を直接計数する手法である^[2]。

【参考文献】

[1]原子力百科事典 ATOMICA, 「放射線測定による年代推定」, (2014)

https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-04-01-11.html

[2]小林紘一, 「加速器質量分析法」, 核データニュース, No. 49 (1994)

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 密閉及び非密封放射性同位元素の取り扱い施設において、けが・急病人、盗難又は所在不明を想定して、事前に準備しておくこと、起こった場合の措置について、あなたが放射線管理の責任者である場合、どのような対応をするか記述せよ。

- (1) 調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (2) 業務を進める手順とその際に、留意すべき点及び工夫を要する点を含めて述べよ。
- (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】

本設問の背景として、「放射性同位元素等の規制に関する法律」の改正について理解しておくことが望ましい。

原子力規制委員会は、平成28年1月にIAEAによるIRRS(総合的規制評価サービス: Integrated Regulatory Review Service)を受査した結果及び「放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告」により、放射性同位元素等の取り扱い施設の事業者に対して以下の事項について要求の強化を勧告されている。

- ・ 応急の措置を講じるための手順の策定、組織や資機材の準備等の事前対策
- ・ 事業者の安全に対する意識の低下、安全確保に係る組織、人といったリソース配分の不足・軽視に対する是正
- ・ 放射線施設の管理責任者のみならず、マネジメント層の積極的な関与

これらを踏まえ、平成29年4月14日に改正法が公布(公布後1年以内又は3年以内に施行(2段階施行))され、また、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律第31条の2の規定に基づく放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則第28条の3の規定による原子力規制委員会への事故等の報告に関する解釈」が令和元年9月1日に施行された。

改正内容の内、事故の報告は、原因究明や再発防止策等を含み、また、放射性同位元素等の取扱いに関して専門的な知識が必要となることから事業者の義務として規定された。また、危険時の措置の強化として、安全・安心に係る説明を適確に実施できるよう危険時に周辺住民や報道機関等への積極的な情報公開及び提供に関すること並びに対応機関との連携を含む危険時の措置の事前対策が要求されることとなった。

以上の点を鑑みて、各問について確認する。

(1) 調査、検討すべき事項とその内容について

想定される事故の事象毎に実施すべき内容を抽出し、それぞれの項目に対して自施設に照らして検証する。以下にその例を示す。

1. 組織、資機材等の整備

- ・ 避難、救助手順： 避難経路、傷病者に対する救助活動方法
- ・ モニタリング、計測手順： 測定器(サーベイメータ、個人線量計)、測定ポイント
- ・ 汚染拡大防止、除染手順： 測定器、汚染拡大防止及び除染に係る資機材の整備
- ・ 通報連絡の手順： 関係機関への連絡方法、事故時の報告様式
- ・ 対応機関(医療、警察等)の連携： 自衛組織での対応、傷病者の救護活動等、対応機関への引継ぎ及び放射線に対する被ばく管理
- ・ 立入制限の手順： 縄張り等、無用な被ばく対策
- ・ 情報公開方法の整備： 適切な時期での情報公開、一般公衆の安全確保に対する責務

2. 教育・訓練に関すること

- ・ 定期的な教育： 基本的な知識の習得、事故時の対応、測定器の使い方、除染方法の習熟
- ・ 定期的な訓練： 開示型、ブライント型による訓練、PDCAによるブラッシュアップ

(2) 業務を進める手順とその際に、留意すべき点及び工夫を要する点

放射線施設の管理について、各状況に応じた留意点の一例を挙げる。

【事前準備】

業務を進めるに際し、(1)で示した組織・資機材等の整備は、実施項目が多岐に亘っており自施設、関係先との調整等も発生するため、施設の規模に応じて必要性等を考慮し、要求事項を満足できるようにすることが望ましい。

また、整備後も平時の段階から事故の発生を念頭に資機材等が使用可能であるかの定期的な点検を行う。

施設管理は、管理者だけが活動するのではなく施設を使用する者全員が協調して対応すべきである。この点も踏まえ、教育訓練等を通じて日頃から安全文化の育成ができるようマネジメント層の関与も含めた仕組み作りが必要である。

【事故発生時の対応】

基本的には、上記の事前準備で整備・教育訓練した内容に基づき対応するが、想定を超える事象が発生する可能性も意識して行動する。

これらの業務を遂行するにあたり責任者は、公衆の安全、環境等に与える影響を考慮し、リーダーシップを図り、各要員との綿密なコミュニケーションにより問題解決に取り組むことが、その後の適切な処置に向けた第一歩になるであろう。

また、昨今の状況を鑑みると、新型コロナウイルス感染症対策も考慮し業務を進めるべきである。

(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

本設問は、業務のマネジメントをどのように行うかが問われている内容と考えられる。

業務を効率的、効果的に進めるためには、関係者と最終目標を共有化し各業務の計画・実行・検証・是正（変更）等の過程において、人員・設備・金銭・情報等の資源を適切に配分することが要求される。

したがって、業務履行上、コスト、納期、リスク等の重要度を評価しながら複数の方策を提起し、口頭や文書等の方法に加えて現在の情勢を考慮してWeb会議システム等の新たなコミュニケーションツールの活用により多様な関係者との間で、明確かつ効果的な意思疎通を行う。

【参考文献】

- [1] 原子力規制委員会 放射線障害の防止に関する法令改正の説明会
https://www.nsr.go.jp/activity/ri_kisei/kiseihou/setsumeikai.html
- [2] 文部科学省 技術士に求められる資質能力（コンピテンシー）
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu7/attach/1413398.htm

II-2-2 可搬型の電子加速器を用いた高エネルギーX線源を開発して、屋外にある橋梁の非破壊検査の実証試験を実施する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チームの担当責任者として非破壊検査の実証試験の業務を進めるのに当たり、下記の内容について記述せよ。

- (1) 調査、検討すべき事項とその内容について説明せよ。
- (2) 業務を進める手順とその際に留意すべき点、工夫を要する点を含めて述べよ。
- (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】

可搬型の電子加速器を用いた高エネルギーX線源を開発して、屋外にある橋梁の非破壊検査の実証試験を実施するプロジェクトに関し、「調査、検討すべき事項とその内容」、「業務を進める手順とその際に留意すべき点、工夫を要する点」、「業務を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方法」について説明するという3つの問題への解答を、専門的知識とその応用という観点を踏まえながら600字の制限内で記載するには、解答を簡潔にしながらも、キーワードやポイントを適切に回答することが求められている。

(1) 調査、検討すべき事項とその内容について

まずはプロジェクトとして開発する高エネルギーX線源の要求事項を明確にするため、橋梁の構造・形状や材質調査を検討する。橋梁への実証試験を想定した線源位置やアクセス性の調査も必要となる。X線源の仕様によっては、電離放射線障害防止規則(1MeV以下)や放射性同位元素等の規制に関する法律(通称:RI規制法,旧称:放射線障害防止法)(4MeV以下)の適用となることを配慮する。また、RI規制法に基づき、4MeV未満の電子加速器は橋梁検査の目的に限って、屋外で使用可能になる点も留意したい。橋梁の実証試験の際の制約となり得る周囲環境の調査、検討についての記載も望ましい。

(2) 業務を進める手順とその際に留意すべき点、工夫を要する点

プロジェクトとして橋梁の調査から高エネルギーX線源の開発・実証試験の遂行手順を簡潔に記載する。調査に基づく①要求事項の検討、②高エネルギーX線源仕様の決定、③試験装置の開発手順、④実証試験の要領・手順の検討、⑤実証試験結果の検証などの主要なプロセスを漏れなく記載する。また、技術的な課題だけではなく、プロジェクトとしての予算や工程についても留意することが望ましい。一例として、仕様の決定の際には、実証試験の要領検討を平行して行い工程短縮などの工夫等が考えられる。

(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

技術士に求められる資質能力のうち、マネジメント、コミュニケーション、リーダーシップに関する記載が求められている。先に解答した業務を進める手順を元に、業務を効率的、効果的に進めるための関係者との調整方法について記載する。X線源の仕様の決定の際に、開発者と試験実務者との協議を設け、試験実施の際の留意事項をフィードバックさせることや、各業務プロセスにおける関係者との情報共有について解答し

たい。また、プロジェクトチームの担当責任者として、コスト・品質・工程の調整方法への配慮が望まれていることにも留意したい。

6. 選択科目Ⅲの解説

令和2年度技術士第二次試験において【選択科目Ⅲ】として出題された各設問に対する解答のポイントを以下に示す。

技術士第二次試験では、決められた枚数の解答用紙内に解答を全て書き込むことが求められるが、本稿での解説はあえて制限にとらわれず、受験者に多くの情報を与えることを旨とした。受験者には、解答用紙に記入すべきポイントを絞り込むスキルも求められるため、試験本番までにはポイントを絞り込む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、ご了承ください。

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設問番号を明記し、答案用紙3枚を用いてまとめよ。)

Ⅲ-1 原子力は重要なベースロード電源と位置付けられ、2030年代の電源構成の20～22%を満たすことが目標とされていることより2030年代には次期炉の設置が必要と見込まれている。現行の規制基準は既設炉を対象としたものであり、改造工事や可搬装置の設置等で基準を満足する対応となっていることより、次期炉ではより安全で合理的な設計が可能であると考えられる。

(1) 以上のような状況を踏まえ、現行規制基準に基づく既設炉の安全性向上対策について、技術者としての立場で深層防護の観点を含めて多面的な観点から課題を抽出し分析せよ。

(2) 抽出した課題のうち最も重要と考える課題を1つ挙げ、その課題に対する次期炉向けの複数の解決策を示せ。

(3) 解決策に関連して新たに生じ得るリスクとそれへの対策について述べよ。

【解答のポイント】

日本原子力学会では2018年から2020年に原子力発電部会「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ(以下、WGという。)にて、次期軽水炉におけるより安全かつ合理的な設計対応が議論されている。本設問は当該WGにおける検討内容を踏まえて記述することが望ましい。以下にWGにおける議論の要点を整理するが、より深い理解のためWG報告書を一読することを推奨する。

(1) 現行規制基準に基づく既設炉の安全性向上対策についての課題の抽出、分析

現行規制基準に基づく既設炉の安全性向上対策の中で、次期軽水炉にて設計段階から考慮することで柔軟に対応可能となる課題として以下が挙げられる。

(a) 可搬型SA設備

既設炉では既存建屋の配置上の制約等からSA対策として可搬型設備(可搬型代替注水ポンプ、電源車など)の設置を基本としているが、可搬型設備の場合には恒設設備と比較して事故時における対応要員の確保、手順書整備や訓練の負担、事故後の準備時間、作業員被ばく等の観点で課題がある。

次期軽水炉では設計段階からSA対策の機能要求を整理した上で、恒設設備の信頼性・現場操作不要というメリット、可搬型設備の柔軟性というメリットを踏まえた恒設/可搬型の最適な組み合わせが可能となる。

(b) 特重施設(航空機衝突(APC)その他テロ対策)

既設炉では特重事象(APC、テロ等)時に格納容器(CV)を防護するための施設として専用の特重施設を設置し、可能な限りDBA/SA設備との多重性又は多様性及び独立性を有し、位置的分散を図ることを要求されている。また、特重施設とSA設備では想定する事象は異なるものの、両者ともCV破損防止機能を要求されており、機能が重複している。

次期軽水炉ではDBA/SA設備に対して設計段階から特重事象も考慮した設備対応が可能となる。

(c) 溶融炉心冷却対策

既設炉ではウェットキャビティ方式によりSA時に溶融炉心を冷却するが、水蒸気爆発等の溶融炉心冷却に係る現象の不確かさの観点から、欧米の新設炉で採用実績のあるドライキャビティ方式等の溶融炉心冷却対策を含め、次期軽水炉における溶融炉心冷却対策の適用には選択肢がある。

深層防護の観点からは、現行規制基準においては、1F事故の教訓を踏まえて、地震・津波などの共通要因による安全機能の一斉喪失の防止、その後のシビアアクシデント(SA)の進展防止に加えて、テロや航空機衝突への対応が強化され、現行規制基準制定以前の既設炉の深層防護の考え方と比べると、それまでの設計基準事故(DBA: Design Basis Accident)(深層防護レベル3)を超える設計拡張事象(DEC: Design Extension Condition)(深層防護レベル4)における炉心溶融防止対策、格納容器破損防止対策が大幅に強化された。一方、日本原子力学会標準委員会技術レポート「原子力安全の基本的考え方について 第I編 別冊 深層防護の考え方」において、「防護策全体の性能を高めるためには、各レベルが適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランス良く講じられ、あるレベルの防護策に負担が集中しないことが重要である」とされており、深層防護レベル間のバランスについて、CV破損防止対策に重点を置いた現状の設備構成は最適化の余地があると考えられる。

(2)抽出した課題に対する次期炉向けの解決策

次期軽水炉では設計段階から考慮することでより安全かつ合理的に対応可能な項目としては以下が挙げられる。イメージ図を図1に示す。

- ・ 内の事象への耐性強化として DBA 設備の多重性を強化。
- ・ 外的事象への耐性強化として、敷地かさ上げによるドライサイト化、安全施設を含む建屋の頑健化、区画分離の徹底等による独立性強化。この際、APC その他テロ対策も合理的に考慮する。
- ・ SA 設備は恒設設備主体とし、不確かさへの備えとして可搬型設備を活用。

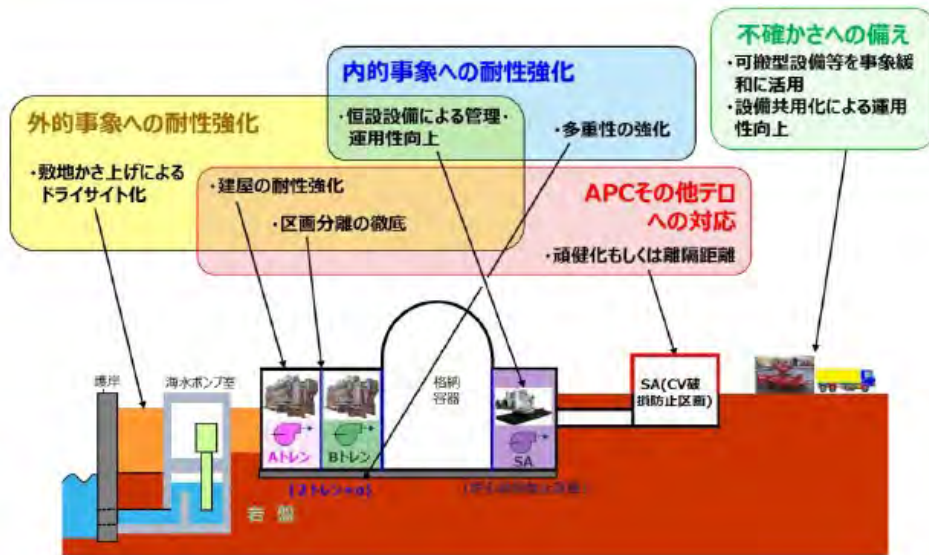


図 次期軽水炉の安全性向上対策の設計例

(3)解決策に関連して新たに生じ得るリスクと対策

次期軽水炉の設計を進める上で(2)に挙げた対策が取り込まれた際、ある深層防護レベルに偏った防護策ではプラント全体の防護性能が有効に向上しないリスクが考えられる。そのため、深層防護レベル間のバランスが取れた防護策が実装できていることの確認が必要となる。対策としては、内の事象、外的事象に対して十分な耐性を有すること、並びに性能目標に対する設計の有効性を評価するため、PRAによる定量的なリスク評価を行うことが有効である。

【参考文献】

- [1] 「次期軽水炉の技術要件について」日本原子力学会 原子力発電部会 次期軽水炉の技術要件検討 ワーキンググループ報告書 (2020年6月)
- [2] 日本原子力学会標準委員会技術レポート「原子力安全の基本的考え方について 第I編 別冊 深層防護の考え方」AESJ-SC-TR005 (ANX):2013

【解答のポイント2】

(1) 現行規制基準に基づく既設炉の安全性向上対策についての課題の抽出、分析

現行規制基準の課題は何かをあげる。その際、題意に沿って、深層防護の「止める」「冷やす」「閉じ込める」の観点に分類して、分析を行う。

(2)、(3)の解答を想定し、(1)の分析を考え、あとで矛盾しないように論じる。以下に解答例を示す。

福島第一原子力発電所の事故に関して、規制上の問題点の一つには、長期にわたる電源喪失が考慮されていなかったことがあげられる。深層防護の観点からは、原子炉を「止める」「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」という3つの要素に関して、独立性、冗長性を持った原子炉システムの構築が重要である。それぞれの要素について課題を述べる。

・「止める」

制御棒による炉停止、負の反応度係数による原子炉の固有の安全性、これらの設備や設計に関しては、福島の事故に際しても、十分機能しており、安全上の課題は少ないと考えられる。一方、海外では、負荷追従運転による原子力発電の経済性向上が図られており、負荷追従運転に対応した反応度の低い制御棒(グレー制御棒)等は、合理化の面から次期炉の設計として検討する余地がある。

・「冷やす」

福島の事故はこの「冷やす」ことに失敗をしたために被害が甚大となった。そのため、次期炉においては、電源、ポンプの確保とともに、電源喪失時に長期間にわたり原子炉を冷やすことが課題となる。

・「閉じ込める」

放射性物質を閉じ込めるためには、格納容器、原子炉建屋の破損を防ぐ必要がある。一方、冷却材喪失事故（LOCA）時は、蒸気による格納容器や建屋の圧力上昇により、最終的には建屋の破損を防ぐために、放射能を含む蒸気を外部に放出するベント操作が必要になる可能性がある。これは福島事故でも生じた問題であり、今後の課題の一つである。また、溶融した炉心を炉内や格納容器内に保持する機能も課題である。

(2) 抽出した課題に対する次期炉向けの解決策

(1) であげた課題の内、一つを抽出し、その解決策を示す。可能なら、次期炉の具体例を示す。以下に解答例を示す。

ここでは、(1) であげた課題のうち、電源喪失時に長時間にわたり原子炉を冷やすこと取り上げる。受動的安全性（パッシブセーフティ）を取り入れたシステムが有効な解決策の一つであり、次期炉向けの解決策としては、以下のような設計が考えられる。

・重力式による炉心冷却システム

炉心より上部に配置したプールに冷却水を保持、電源喪失時は、重力により冷却水を炉心、格納容器に注水。ウェスチングハウス社の最新の PWR、AP-1000 でも取り入れられているシステムである^[1]。

・小型モジュール炉による自然冷却システム

原子炉自体を小型化することで、炉心の熱量低減、放熱面積の拡大により、空冷による炉心冷却が可能となる。東芝の小型高速炉 4S でも取り入れられている概念である^[2]。

・原子炉圧力容器内溶融物保持（In-Vessel Retention ; IVR）^[3]

炉心損傷後に溶融炉心が原子炉圧力容器底部に落下した際に、原子炉圧力容器内で溶融デブリが冷却され、原子炉圧力容器内に保持される設計である。

(3) 解決策に関連して新たに生じ得るリスクと対策

(2) であげた解決策のリスクを示す。上述のように、(2) (3) が(1) と矛盾しないように、予め書く内容を大まかに考えておくとよい。以下に解答例を示す。

上記システムのリスクを述べる。

・重力式による炉心冷却システム

重力式でも、冷却水が尽きれば、冷却ができなくなる。AP-1000 においても、いわゆる猶予期間（グレースピリオド）は 7 2 時間であり、その間に電源復旧が必要となる。そのため、7 2 時間以上電源喪失が起こった場合、冷却ができなくなるというリスクがある。

この対策としては、電源車の確保、号機間の電源の融通などの対策が考えられる。

・小型モジュール炉による自然冷却システム

小型炉においては、出力が小さいために、自然冷却が可能という安全性の観点からは、経済性の観点からは、得られる電気出力が小さいというデメリットがあり、これは導入を困難にする大きなリスクである。一般的に小型炉は割高であると言われるが、システムの簡素化により初期建設コスト低減を図ることができれば、上記リスクに対する対策となる。米ニュースケール社など、多くの企業が、安価な小型モジュール炉の開発を進めている。

・原子炉圧力容器内溶融物保持（In-Vessel Retention ; IVR）

原子炉圧力容器内の溶融炉心の状態（自然滞留／成層化）、原子炉圧力容器からの除熱性能など、IVR による溶融炉心の保持の成立性に係る物理現象の不確かさが大きいことがリスクとして挙げられる。

【参考文献】

[1] 野田、棚沢、吉田「ウェスチングハウス社の技術と東芝との連携」東芝レビューVol. 62 No. 11(2007)

[2] 大田、福家「小型高速炉 4S と高速炉技術」東芝レビューVol. 65 No. 12(2010)

[3] In-Vessel Melt Retention And Ex-Vessel Corium Cooling Summary Of A Technical Meeting, IAEA-TECDOC-1906

https://www-pub.iaea.org/MICD/Publications/PDF/TE-1906_web.pdf

III-2 新たな検査制度の導入に伴い、原子炉施設の施設・設備状況に係る検査の実施主体が、規制当局である原子力規制庁から原子炉事業者・原子炉設置者に変更され、原子炉施設の施設・設備状況に係る検査内容については、事業者・設置者の責任においてその幅が広がること法的に容認されることとなった。

上記のような状況において、実用発電用原子炉施設の運転中保全の導入検討に関して、下記の問いに答えよ。

(1) 技術者としての立場で多面的な観点から課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。

(2) 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示せ。

(3) 解決策に関連して新たに生じ得るリスクとそれへの対策について述べよ。

【解答のポイント】

新しい検査制度については、事業者が一義的責任を負う観点で、事業者が検査を行い、規制当局は、この検査の対応を含めた保安活動全般を觀察するという考え方となる。原子炉事業者・設置者は、運転中も含めた最適な時期での保全の実施、プラントの安全・安定運転に不可欠な保全の作業量の平準化、現場作業員が余裕を持って作業可能なスペース・時間等の確保（定期検査時の作業輻輳の回避）といった現場のニーズもあることから、運転中保全の導入を含め事業者・設置者の責任においてその幅が広がる^[1]。

(1) 技術者としての立場で多面的な観点から課題の抽出とその内容について

原子炉施設の運転中保全の導入検討に関して、以下の観点から課題を抽出した。

①プラントの安全性・安定運転の観点

運転中保全は、原子炉運転中に安全機能を果たす系統の多重化されたトレイン（安全機能を達成するために必要な一連の機器等の構成）の一つを、待機除外することによって停止状態にして保全を行うものである。そのため、多重化の設計要求との整合を踏まえて運転段階で安全上重要な機能を有する系統が直ちに稼働できる状態にあることを運転上の制限として要求しており、これらの安全に関する要求との整合を図ることが課題である^[1]。

②経済性・安全性の効果の観点

運転中保全では、運転中も含めた最適な時期での保全の実施、プラントの安全・安定運転に不可欠な保全の作業量の平準化、現場作業員が余裕を持って作業可能なスペース・時間等の確保（定期検査時の作業輻輳の回避）が可能となり、保全作業の品質向上による発電所の安全性向上と設備利用率向上に寄与することについて、運転中保全の導入判断のため、導入による経済性や安全性の効果を定量的に評価することが課題である。

③保全計画及び保全実施計画立案の観点^[2]

保全計画を立案するに当たっては、まず膨大な数の機器から成るプラントのシステム構成を知り、保全対象機器の故障がプラントの安全性あるいは運転継続性にどの程度影響を与えるかその影響度（重要度）を考慮した上で、対象機器の設計と発生する経年劣化の特性を把握して適切な保全計画を立案することが課題である。また、保全実施計画を立案するに当たっては、保全作業のパフォーマンス（保全遂行能力）を決定する主要因子（保全作業要領書、保全実行部隊、使用資機材）を適切に考慮して保全実施計画を立案することが課題である。さらにこれらを運転中保全であることを考慮した計画とすることが課題である。

④原子力運転検査官による「フリーアクセス」活用の観点

新たな検査制度では原子力規制庁の運転検査官が「フリーアクセス」を活用し、必要とする情報・場所等に自由にアクセスして、現場の状況等を直接監視し、事業者のパフォーマンスを評価する仕組みとなっている。従って、運転中保全の導入検討にあたっては、事業者から運転検査官への事前説明を十分に行い、規制当局とも良好にコミュニケーションをとった上で進めていくことも課題である。

(2) 最も重要と考える課題と複数の解決策について

(1) に挙げた①プラントの安全性・安定運転の観点での課題に対する複数の解決策について示す。

①待機側トレインの評価による解決策^[1]

多重化で要求される信頼性のレベルを下げることなく待機側トレインによって安全機能・能力が高い信頼性で維持できていることを示す。運転中保全実施前に待機側トレインを構成する機器等の故障頻度に基づく評価、過去の保全履歴の確認や過去のトラブル原因の除去などの不適合管理の実施状況の確認、機器の動作確認等を実施し待機側トレインの信頼性を確認する。

②代替設備による解決策^[1]

代替設備によって待機除外するトレインの安全機能・能力が維持できることを示す。待機除外するトレインに変わる代替設備を用意することによって、運転中保全のために待機除外しても系統の多重性で要求される信頼性のレベルを下げないことを確認する。

③状態基準保全の導入による解決策^[2]

時間基準保全（TBM）、状態基準保全（CBM）、事後保全（BDM）を考慮したベストミックスの保全を計画する。特に、状態基準保全の導入により、運転中においても機器内部に発生・進展する経年劣化に特有の信号（例えば、振動）の発信を捉え、分析・評価することで、機器の運転状態をモニタリングし、得られたデータを活用して故障時期を推定することができる。

(3) 解決策に関連して新たに生じ得るリスクと対策について解決策に関連して新たに生じ得るリスクとして、評価の不備によるトラブルの発生、力量不足による点検判定の不備、点検作業の形骸化がある。

これらのリスクへの対応として、経験者による第三者レビューの実施などによる検査の品質向上、技能、経験、技術力を有する要員の補充や教育の徹底による検査員の技術力の向上、自らの改善を促進する体系を維持促進するため保全改善PDCAや安全・セキュリティの文化醸成活動を行うなどがある^[2,3]。

【参考文献】

[1] 運転中保全の実施に向けた検討について、原子力安全・保安院、平成22年11月

[2]原子力発電所の保全活動を適正化するために必要な基本的事項とその解説、(一社)日本保全学会 保全標準化推進検討会、2020年6月

[3]原子力規制委員会ホームページ

<https://www.nsr.go.jp/index.html>

【類似問題】

[1] 平成30年度試験問題「原子炉システムの運転及び保守」(Ⅲ-2)

[2] 令和元年度試験問題「原子炉システム・施設」(Ⅲ-2)

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設問番号を明記し、答案用紙3枚を用いてまとめよ。）

Ⅲ-1 令和元年度末時点で廃止措置段階となっている原子力施設は、実用発電炉11炉（東京電力福島第一原子力発電所を除く）をはじめとして多数に上る。そこで発生する放射性廃棄物の処分手続きの1つとしてクリアランス制度がある。対象施設の増大が見込まれるなか、現在、日本では事業者が自主的に再利用先を限定している。このような状況では、計画的な廃止措置の実施に影響が及ぶことも考えられる。今後、クリアランス制度を効率的に実現していくに当たり、以下の問いに答えよ。

- (1) 技術者としての立場で多面的な観点から課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。
- (2) 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示せ。
- (3) 解決策に共通して新たに生じ得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。

【解答のポイント】

クリアランス制度とは、原子力事業者等が、施設等において用いた資材、その他の物に含まれる放射性物質について、原子力規制委員会が定める基準（クリアランスレベル）以下であることの確認を受ける制度である。この確認を受けるには、あらかじめ放射能濃度の測定及び評価の方法について原子力規制委員会の認可を受けた方法で、その対象物の放射能濃度の測定及び評価を行った上で、その結果を原子力規制委員会へ提出する必要がある。これにより、放射線による障害の防止のための措置を必要としないものとして扱うことができる^[1]。

これにより、クリアランス後の対象物は資源として再使用・再生利用（以下「再生利用等」という。）が可能になるとともに、再生利用等が合理的でない場合には放射線防護の観点を考慮する必要がない処分ができるなど、廃棄物等の処理処分及び再生利用等を安全かつ合理的に扱うことが可能となり、我が国が目指す循環型社会の形成に資することとなる^[2]。

しかし、2005年にクリアランス制度が制定されて以降、制度が社会に定着するまでの間、事業者が自主的に再利用先を限定することで、市場に流通することがないようにしており、クリアランス確認後のリサイクル先は、電力業界内での活用や、理解促進のための展示に限定している。今後、例えば金属では2020年では年間1000トン程度発生しているが約10年後の2030年には10倍程度発生する見通しとなっており^[3]、計画的な廃止措置の実現するためには、今後大量に発生するクリアランスレベル以下の廃棄物や有価物に対して、クリアランス制度を効率的に実現していく必要がある。

クリアランス制度を効率的に実現していくに当たり、いくつかの課題を示し、課題ごとに複数の解決策と解決策に共通して新たに生じるリスクをそれへの対策について解答のポイントを整理する。

(1) クリアランス制度についての理解の促進と信頼の醸成

発電炉の解体では、これまでの研究炉やプロトタイプ炉の例と比べて、解体廃棄物の量が顕著に増大する。こうした中で、クリアランス後の廃棄物に対する公衆の関心が高まる傾向があるため、ステークホルダーから受け入れてもらうことが課題となる^[4]。

その解決策として、以下が考えられる。1. 発電炉の解体に関する資料館においてクリアランス制度についての展示を行う。2. クリアランス廃棄物の埋設処分場のステークホルダーに対し、建設前、建設中、建設後に説明会を開催する。3. クリアランス廃棄物の埋設処分に関するQ&Aなどのウェブサイトを設置する。

しかし、クリアランスレベル検認制度が安心感をもって受け入れられるためには、当事者である原子力事業者への信頼の維持が重要となり、原子力事業者に対する信頼を失墜するような行為が生ずれば、クリアランス制度への影響は甚大となるリスクがある^[2]。

このための対策として、原子力事業者に対して、信頼を失墜するような行為を行わないように、核セキュリティ文化醸成活動を実施する。

(2) クリアランス制度での再生利活用に向けた制度設定について

クリアランス制度により、対象物は放射性物質として扱う必要のない物であるので、所要の法的措置により原子炉等規制法関係法令の適用を外れ、一般的に定められたリサイクル、産業廃棄物処理に関する法令の適用対象となり、資源として有効利用されるか、資源としての有効利用が合理的に行えない場合は産業廃棄物として適正に処理することができる。また、できる限りこれらを再生利活用できるような制度設定をすることが課題である。

その解決策として、以下が考えられる。1. クリアランスされた物に本来放射性廃棄物として扱われるべきものが混在することのないよう、厳格な運用を遂行する。2. 多段階にわたって確認するなど、検認制度は高い信頼性を有するものとする。3. 検認の対象物は事前の評価に基づき、十分クリアランスレベル以下であることが見込まれる物を選定する。

しかし、不測の事態により、放射性廃棄物として扱うべき物がクリアランスされた物に混入し、事業所外に搬出、廃棄されるような事態が生じるリスクがある。

このための対策として、問題となるような状況が認められれば、必要に応じ事業者に対して放射性廃棄物の回収を含む適切な措置を講じ、違法行為が認められれば、厳罰を適用することも必要と考えられる。さらに、上述の対応を容易にし、また国民の検認制度への信頼感を高めるためには、原子力事業者においてはクリアランス制度が社会に定着するまでの間、処分、再生利用の際の最初の搬出先が把握できるよう、例えば、

埋設処分であれば処分場を、有価物として再生利用する場合には中間処理を行う会社等について、把握・記録するような枠組みを構築することが考えられる^[2]。

(3) クリアランス制度のための放射能濃度の測定について

クリアランス制度で必要となる放射能濃度測定は放射性廃棄物の測定に比べて低い濃度を検出することが求められる。測定により放射性核種濃度を決定する場合には、放射線測定装置により対象物の放射線及び測定場所のバックグラウンドを測定し、対象物の放射線からバックグラウンドを差し引いた結果に対して、予め設定した放射線測定装置の測定効率を用いて放射性核種濃度を評価することとなる。したがって、クリアランスレベル以下であることの判断を確実に行うためには、対象物に合わせて適切な放射線測定装置の選定と測定条件の設定をすることが必要となり、さらに、対象物の形状、汚染の形態、含まれる放射性核種が違うことが課題となる^[2]。

その解決策として、以下が考えられる。

1. 申請毎に決まったものに対して決まった手法で許可する。
2. 様々な測定装置の組み合わせで測定時間を組み合わせで測定する。
3. 対象物を粉砕するなどして、均一に分散させた指定した形状に加工して測定する。

しかし、クリアランスが確認されるまで時間がかかり、発生する対象物に対して処理能力が足りなくなるなどのリスクがある。

このための対策として、個別で核種選定から実施するのではなく、測定方法を規格化して装置の型式認定制を導入することにより、測定評価方法の許可、測定結果の確認に対する効率化が期待できる^[5]。さらに、廃炉計画を調整することで、クリアランス検査の需要と供給を調整することで、廃炉計画とクリアランス制度を効率的に実現していくことが可能となる。

【参考文献】

[1] 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>

[2] 原子力施設におけるクリアランス制度の整備について、総合資源エネルギー調査会ら、平成16年9月14日

[3] 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

[4] 令和元年度版原子力白書、原子力委員会、令和2年8月

[5] クリアランス制度に関する課題、電気事業連合会、平成28年5月13日

<https://www.nsr.go.jp/data/000209803.pdf>

III-2 原子力分野では、人が接近できない高線量環境での操作を可能とするためにロボット技術を開発してきた。また、工場や物流倉庫では省力化のためのロボットを使用してきた。最近では、家庭向け掃除ロボットが店頭で販売され、教育用ロボットも手軽に入手できるようになってきている。ロボットのような高度な制御を用いた機械装置の技術が加速的に進むなか、今後、核燃料サイクルの施設や廃棄物処理等の現場で高度な制御を用いた機械装置を使用する場合について、以下の問いに答えよ。

- (1) 技術者としての立場で多面的な観点から課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。
- (2) 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示せ。
- (3) 解決策に共通して新たに生じ得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。

【解答のポイント】

(1) 課題について

本問では、背景として各種のロボット導入に関する事例が広く述べられているが、後段の問いの部分では、「高度な制御を用いた機械装置を使用する」ことを想定しており、焦点をその部分にあてた答案構成としたいところである。ここでは、一般的なロボット開発で考慮すべき事項、福島第一原子力発電所事故への対応、その他の核燃料施設での遠隔装置等による保守技術等に係る文献などから、課題として考えられることについて、情報提供する。

福島第一原子力発電所事故以前より、原子力防災に係るメカトロニクスの開発において、以下の技術的な課題があることが認識されていた。

- ① 電子部品の耐放射線性、耐熱性向上が必要
- ② 無線制御技術の高度化が必要
- ③ 専用ツールの充実・高度化・インテリジェント化が必要
- ④ 運転操作技術の高度化が必要
- ⑤ 防災支援ロボットの共同作業、操作性向上に係る研究が必要。

そのような認識がなされ、国内においても原子力防災対策として一定のロボット開発等が進められていたが、福島第一原子力発電所事故では、当初、多くの外国製品が使用された。

その理由として、

- 海外の国々では、原子力災害への対応の義務付けや軍事的な理由により、国を挙げて、これらの開発に取り組んできたこと。特に軍事用のものについては、戦場で使用された実績がある。
- 逆に、日本では機能に優れたロボット開発の研究が大学等で行われたものの、実戦経験が乏しい。その理由として、
 - ▶ 災害対応ロボットは、買い手、利用者が特殊、極めて限定的であること
 - ▶ JCO臨界事故の際に、事故対応ロボットの必要性が認識され、当時、予算化されたものの、「原子力プラントでは事故は起こらない」とのいわゆる安全神話が支配的となり、国、自治体、電力会社のいずれもが原子力事故対応ロボットの必要性を認めなかった。

との指摘もある。この指摘は、防災対策に係るコミュニケーション、プラントの安全性の評価、アクシデントマネジメントに係る問題解決などと関連性がある。

このほか、多面的な側面として挙げたい項目に、セキュリティの問題、設備の維持管理、オペレータの育成・訓練などがある。

- 通常、高度な制御を行う場合であっても、映像や機械の状態に係る情報について、伝達する必要がある。妨害破壊行為に利用されないよう、こうしたデータを保護することを考慮する必要がある。
- 通常状態で使用していないものについて、一定の資源を投資し、装置の維持管理を図る必要がある。
- 装置自身を使用しやすくすることは言うまでもないが、操作を行うオペレータを育成し、必要な時に操作できるようにしておく必要がある。

(2) 解決策について

先に挙げた課題の中から、受験者自身が回答しやすい課題の一つを選び、答案を作成することになる。ここでは、主要項目について、通常、考え得る対策と技術的特徴等を整理して、参考情報として示しておく。

項目	考えられる対策
耐放射線性	① 耐放射線性の高いデバイスの使用：この方策で対応できれば、高度な制御が可能となるが、放射線環境が予想できない場合など、操作不能に陥る可能性がある。 ② 電子制御によらない機械的機構の採用：①に比べ、操作性は劣る可能性があるが、放射線の影響により操作不能に陥る可能性は小さい。事前に機械の動作確認を繰り返し行い、信頼性を確認しておくことが可能。 ③ 遮へい体の取り付けによる装置の防護：デバイス自身で放射線環境に耐えられない場合に装置自身が受ける吸収線量の低減を図る対策。遮へい体を搭載した状態での動作が必要となるので、駆動源の増強、大型化を伴う。 ④ 装置を使用するための現場環境の改善（遮へい板設置、除染など）：装置が耐えられる程度に除染を行うか、遮へい体を配置する対策。除染等の処置を直接的に行う場合には、その作業における作業員の被ばくを考慮する必要がある。
制御方法（無線/有線）	① 無線方式：コンクリートに閉ざされた空間で使用することになる。反射、混信などを生じる可能性がある。無線が途切れた場合の動作について考えておく必要がある。 ② 有線方式：有線方式では、機械の動作に伴い、ケーブル等をひっかけるなど障害になる可能性がある。距離が長くなるとその可能性が高まるため、配慮が必要となる。 ③ アクセスルート、操作場所の想定等との関連があり、それらの制約条件の中で制御方法を考える必要がある。
その他の考慮事項	<ul style="list-style-type: none"> ● アクセスルートの選定によって、装置の態様が異なる。 ● メンテナンス性を考慮しておく必要がある。装置が故障した場合の回収方法、救援方法など。部品交換等を必要とする場合の交換方法等。通常、放射線環境下で使用した場合、放射性物質で汚染されるため、除染性を考えて単純な形状にしておくのが望ましい。 ● 模擬設備による操作訓練（モックアップ）など、装置使用前に操作の習熟を図る。使用時間の制限がある場合などは特に習熟度を高め、綿密に計画しておく必要がある。 ● 現場の環境が分からない、不確実性がある場合には、可能な限り不確実性を少なくするために緻密な現場調査を実施し対策を施すことを検討する。現場の状況調査を行うロボット、その後の対処を行うロボットなど、試行錯誤を含めた段階的な対応によらざるを得ない場合がある。

(3) リスクについて

個々の技術的な対策については、本来、それぞれに固有のリスクが存在すると考えられるが、ここでは、共通して新たに生じるリスクについての記述が求められている。(2)で記述した対策に関し、共通するリスクを挙げて答案することになるが、その観点として、以下のような観点で、リスクを整理し、技術的見解を記述することが考えられる。

- 故障等により操作不能となり、装置の使用目的を果たせない。更に、続く作業の支障になる。
- 想定外の事態により、直接的な対応が必要となり、作業員の被ばく量が増加する。
- 速やかな対応ができないことによる影響。例えば、操業停止、事故による被害の拡大等

【参考文献】

- [1] 浅間一、“東日本大震災及び福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（1）”（2011）
- [2] 浅間一、“東日本大震災及び福島第一原子力発電所事故におけるロボット技術の導入とその課題（2）”（2011）
- [3] 浅間一、“福島第一原子力発電所の廃炉におけるロボット技術の活用と今後の課題”（2018）
- [4] 大西献ら、“原子力災害対応ロボットの設計と開発”（2014）
- [5] NEDO ロボット白書 2014
- [6] 原子力百科事典ATOMICA「原子力用ロボット（02-08-01-04）」
- [7] 原子力百科事典ATOMICA「ロボットによる遠隔解体技術（05-02-02-03）」
- [8] 月刊技術士“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”（2018. 4）
- [9] 月刊技術士“燃料デブリの取り出しに係る検討状況と遠隔技術”（2016. 10）
- [10] 月刊技術士“東海再処理施設における保守管理技術とその展望”（2015. 6）

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設問番号を明記し、答案用紙3枚を用いてまとめよ。）

Ⅲ-1 我が国では、国際原子力機関（IAEA）が示す国際基準との整合性の観点から放射線源による緊急事態への対応等について放射線規制に関する取組を強化すべきとのIAEA総合規制評価サービス（IRRS）における勧告に踏まえて、危険時の措置の強化等を図る放射性同位元素等規制法の改正が行われた。このようなことを背景として、重篤な確定的影響を及ぼす被ばくが生じ得る数量の極めて大きい放射性同位元素の使用施設又は大規模研究用加速器施設について、以下の問いに答えよ。

- (1) 放射性同位元素等の使用方法に応じた緊急事態への事前対策や危険時の情報提供について、法的要求事項も踏まえて実施すべき項目を列挙し、それらの項目に対して技術者としての立場で最適化の観点から多面的に課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。
- (2) 最適化の観点から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示せ。
- (3) 解決策に対して生じ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。

【解答のポイント】

原子力規制委員会は、平成28年1月のIAEAによるIRRS（総合規制評価サービス）の結果および「放射性物質及び関連施設に関する核セキュリティ勧告」を踏まえ、平成29年4月14日に改正放射線障害防止法を公布した。今回の法令は2段階で施行され、第1段階として平成30年4月1日に①報告義務の強化②廃棄に係る特例③試験、講習等の課目の規則委任④危険時の措置の強化⑤教育訓練等が部分的に施行された。第2段階としてはセキュリティ対策の強化等について平成31年9月1日に施行された。^[1]

改正に伴い、法律名も「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」から「放射性同位元素等の規制に関する法律」へ変更された。

本問題は、平成30年4月1日に改正施行された④危険時の措置の強化の内容を問う問題である。

(1)-1 放射性同位元素等の使用方法に応じた緊急事態への事前対策や危険時の情報提供について、法的要求事項も踏まえて実施すべき項目を以下に列挙する。

■事前対策の要求内容

対象となる許可使用者は、以下の内容を予防規程又は下部規程（委託する規程等）に要求する必要がある。

○判断基準と対応

「放射線障害のおそれがある場合又は放射線障害が発生した場合」を、具体的に判断するための基準を設定し、基準に対応した措置の手順を放射線障害予防規程に定めることを要求（通報、応急措置等の対応の基準と手順）する。

判断基準と対応の具体例としては、使用実態が多様なため、事業者が実態に応じて判断基準と対応手順を下表のように設定する必要がある。

区分	想定する事象例	準備する対応手順の例
放散性RⅠ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射性同位元素の管理区域外への漏洩、飛散 ・ 内部被ばくの発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通報連絡の手順 ・ モニタリング・計測手順 ・ 拡大防止・除染の手順 ・ 作業者等の避難・救助の手順 ・ 立入制限の手順 ・ 消防・医療機関等への対応手順
非放散性RⅠ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遮蔽の喪失 ・ 外部被ばくの発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通報連絡の手順 ・ モニタリング・計測手順 ・ 線源の収納または遮蔽の手順 ・ 作業者等の避難・救助の手順 ・ 立入制限の手順 ・ 消防・医療機関等への対応手順
放射線発生装置	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外部被ばくの発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通報連絡の手順 ・ モニタリング・計測手順 ・ 作業者等の避難・救助の手順 ・ 消防・医療機関等への対応手順
共通	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管理区域の火災 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通報連絡の手順 ・ 自衛消防等の対応手順

○組織・資機材の整備、訓練

通報連絡、退避・救出、汚染の拡大防止や除染等のために必要な体制の構築や資機材の整備・維持管理を行うとともに、訓練の実施について放

放射線障害予防規程に定めることを要求する

組織・資機材の整備、訓練の具体例としては、

・組織・資機材の整備

応急措置を行うための組織及び要員について

外部機関及び事業所内の連絡体制について

異常事象を検知する測定機器及び事故収束に使用する機材について

【資機材の例】

遮蔽具、かん子又は保護具（放射線発生装置を除く事業者）

エリアモニター、サーベイメーター等

（放散性R I の対象事業者のみ）防護マスク、汚染防護服

（事故時に高線量が想定される場合）作業にあたる者のアラーム付の個人用外部被ばく線量測定器等

・訓練（各年度に一度の訓練の実施を要求）

訓練の実施について

※ 実施する訓練の内容は、初動対応から事故収束までを通した訓練である必要はなく、年度によって、一部のシナリオを想定した消火訓練、通報訓練、避難誘導訓練等の要素訓練でも可

※ 実施した訓練を評価することで、次年度の訓練の改善点や手順を見直し、応急の措置の実効性を高めるために、訓練の計画策定・評価・改善に係る手順を定めること等を要求

○対応機関との連携

あらかじめ連絡方法、対応手順等について、対象となるRI事業者と、消防機関、医療機関等との間で、事前対策の共有を要求する。

対応機関との連携の具体例としては、以下のとおり。

・消防機関との連携

事業所の図面、放射性同位元素の種類、性状等、消防機関の活動に必要な情報を予め共有し、危険時に事業者と協力した対応手順について確認

消火時や救助時の留意事項について事前に共有、地域消防による事業所内の視察や点検などの定期的な実施等

訓練の実施への助言等

被ばく又は汚染のある傷病者の搬送先及び方法について、事前に共有

・医療機関との連携

被ばく又は汚染のある傷病者の受入れについて、事前に（受入れ可能な）医療機関との間で認識を共有しておく※

※原子力規制庁と関係省庁が連携し、地域における受け皿の整備について検討した上で、事業者に対して情報提供を実施

・警察との連携

事業所の図面、放射性同位元素の種類、性状等、警察の活動に必要な情報を予め共有し、危険時に事業者と協力した対応手順について確認

■危険時の情報提供

○情報提供の現状

住民への説明、報道機関への情報提供は事業者の自主性によっている。このため、事業者により情報提供の手順化をしているところ、手順が検討されていないところなど、対応はまちまちである。

○IAEA（安全要件）の要求事項

放射線の緊急事態の発生時には、公衆に有用で正確な情報の提供、風評への対応及びメディア等を含む外部からの問合せに対応する取り決めを作成することを要求している。

○周辺住民の理解が不可欠

RI施設での火災発生時にRIの放出には至らなかったものの、情報提供が後手に回り、住民からの情報公開を求められた事例があった危険時に周辺に影響が及ばない場合でも、事業者が情報を積極的に公開し、安全・安心に係る説明責任を果たすことが必要である。

○外部への対応

危険時に、外部に正確な情報を提供するとともに外部からの問合せに対応するための方法（情報提供の内容、手順等）を予防規程等に要求する。

予防規程又は下部規程へ要求する項目及び内容は、以下のとおりである。

・情報提供を実施する組織及び責任者

・外部への情報提供方法・外部からの問合せ対応方法

ホームページの活用

問合せ窓口の設置

- ・外部へ提供する情報の内容
 - 発生日時及び発生した場所
 - 外部への影響の有無（汚染の状況等）
 - 測定方法（測定機器等）及び測定結果
 - 原因、再発防止策

また、地方自治体等と協定等を締結している場合は、これらにも速やかな情報提供等が行える体制を併せて構築することも重要である。^[2]

(1)-2 前記の項目に対して技術者としての立場で最適化の観点から多面的に課題を抽出し、その内容を観点とともに示す。

予防規程又は下部規程を最も効率的に運用するためには、放射線安全管理体制を最適化する必要がある。

重篤な確定的影響を及ぼす被ばくが生じ得る数量の極めて大きい放射性同位元素の使用施設および大規模研究用加速器施設では、施設に応じた組織や人員が確保されているが、各施設特有の放射線管理に関する専門知識を有する人材が十分に揃っていない例も考えられる。上記大規模施設に関しては、規制当局の示す共通する画一的な規制に基づき整備された放射線安全管理体制ではなく、実用に即した放射線安全管理体制の構築が望まれる。

整備する放射線障害予防規程や下部規程の内容に関しても、上記大規模研究施設は他に類似例が少なく、原子力発電所等の原子力関連施設のような標準的な施設運用に対する定型的内容ではなく、各施設独自の内容が必要である。

例えば大規模研究用加速器施設を見ても、SPring-8のような大型放射光施設は高エネルギーで大電流の電子や陽電子を加速、蓄積するが、加速粒子が軽い電子、陽電子であるため、周辺機器の放射化よりは、加速器から発生するガンマ線等の放射線の遮蔽に重きを置くことになる。一方、理化学研究所の重イオン加速器は重たい粒子を加速するため、加速器構成機器の放射化の確認が必要となる。高エネルギー加速器研究機構やJ-PARCの加速器も用途に応じ、加速粒子、エネルギー、電流量が異なり、特にJ-PARCでは中性子実験施設もあるため、原子力発電所の管理に似た中性子の管理も発生する。そのため、それぞれの加速器に応じた管理体制や予防規程が必要となる。また、量子科学研究開発機構放射線医学総合研究所の医療用の加速器では、治療のため重粒子を直接患者に照射するため、独自の管理基準が必要となる。

教育、訓練、人材育成に関しても、施設ごとに異なる内容となるため、施設の特徴に合致した内容にする必要がある。

(2) 最適化の観点から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示す。

(1)で挙げた検討すべき事項の中で、最も重要と考える課題は、各自の考えに基づき選択することで良い。放射線安全管理体制については、法令順守の観点だけでなく、法令が求めるものを理解する必要がある。

今回の法令改正で特に強調されている点は、法令の思想の根幹としての放射線安全、文化の醸成である。IAEA基本安全原則の「原則1：安全に対する責任」では、「安全のための一義的責任は放射線リスクを生じる施設と活動に責任を負う個人または組織が負わなければならない」とされており、放射線安全確保のためには各施設における放射線取扱主任者、マネジメント層の関与が不可欠であり、各施設が自主的に、より積極的に放射線安全管理に取り組むことが求められている。従来は施設ごとに特色があるにもかかわらず、多くの施設では規制当局の示す共通する画一的な規制に基づき、例示されたマニュアル通りに安全管理業務が遂行されてきた。しかし、今後は自主的に自分の施設に見合った管理を実施することが求められる。

また、多くの施設では放射線障害予防規程において放射線管理に直接関与していない学長、研究所長、社長をトップとした安全管理組織図を作成している。しかし、そのようなトップは、年一回の形式的な放射線安全委員会で議長を務めることはあったとしても、日常的な業務はもとより、立入検査、定期検査等の対外的な検査に立ち会うことはない。今回の改正では、放射線安全組織として、必ずしも学長、研究所長等ではなく、人的及び財物的確保ができ、リーダーシップを発揮して放射線安全を推進できる者をトップとして構築することを求めている。^[3]

(3) 解決策に対して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す。

ここでは、(2)で提示した解決策に対する効果を具体的に示し、派生する問題点やリスクについて説明する。

施設が自主的に責任のある放射線管理を実施するということは、それだけ施設の自由度が高まることを意味する。放射線利用の形態はさまざまである。施設の取り扱っている放射線源のグレードに応じてリスクを評価することにより、過剰に保守的な管理ではなく、自施設に最も適応した放射線安全管理体制を構築することが可能となる。

しかしながら自主性に任せ、独自の管理基準を策定するためには、基準の妥当性を評価する必要がある。そのため、独自の評価シナリオを作成しようとする時には、シナリオ構築に用いる数値のエビデンスが問題となる。

ただここでは、他の多くのパラメータを用いて成り立つ評価シナリオにおける個々のエビデンスは過度に精度の高いものを求める必要はない。規制当局も従来の画一的な規制ではなく、各施設がいかに関自主的に放射線安全に取り組み、実施しているのかを適切に評価する必要がある。

【参考文献】

- [1] 原子力規制委員会ホームページ

https://www.nsr.go.jp/activity/ri_kisei/kanrenhourei/index.html

https://www.nsr.go.jp/activity/ri_kisei/kiseihou/setsumeikai.html

[2] 原子力規制委員会 法令改正の概要（平成30年9月4日更新）

[3] ナガセランダウケア NLだより トップコラム ニツ川 章二, 「放射線障害防止法」から「RI 規制法」へ, (2018)

【類似問題】

・令和元年度 放射線防護及び利用 III—1

III-2 中性子の学術研究や産業開発への利用が拡大しており、研究用原子炉の他に、中性子の利便性を高めるために加速器を用いた中性子源の開発が積極的に進められている。特に、大強度陽子加速器施設（J-PARC）のような大型加速器に対して、比較的管理が容易な小型の加速器中性子源の開発などが模索されている。このような状況を考慮して、以下の問いに答えよ。

- (1) 中性子源の国内及び世界の利用現状を俯瞰して、技術者としての立場で多面的な観点から課題を抽出し、その内容を観点とともに示せ。
- (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示せ。
- (3) 前問（2）で提示した解決策に伴って新たに生じ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。

【解答のポイント】

(1) 中性子の特徴を述べ、どのような分野で利用が増えているのかを論じる。(2)、(3)の解答を想定し、課題を考え、あとで矛盾しないように論じる。以下に解答例を示す。

中性子はX線と異なり、軽元素に感度を持ち、この特性を生かして、有機材料や高分子材料など、X線では困難な対象物に対して非破壊検査や分析が可能である。中性子回折は世界および国内の中性子源利用の大きな利用用途の一つとなっている^[1]。さらに、腫瘍の発生部位によってはγ線や電子線より高い効果が得られるがん治療への応用（ホウ素中性子捕捉療法：BNCT）も進められている。

国内ではここ数年、小型加速器駆動中性子源がいくつか作られている。中性子ラジオグラフィ（NRT）装置、加速器駆動中性子源のビームラインでの可燃物の計測やMeV エネルギー領域の高エネルギー中性子の計測が行われてきている。大強度中性子による精密測定は学術目的だけでなく産業界へも広がりを見せておりユーザーの裾野は年々広がっている。大型施設以外の中性子源がこれらユーザーの受け皿としても機能しており、加速器駆動小型中性子源が建設され利用されている。一方、海外では、アメリカ、中国、スペイン、ドイツ、イタリアと中性子源を建築もしくは計画を立ち上がっており、研究用原子炉を代替する中小型加速器駆動中性子源を作って各国に1台は中性子源を維持しようという機運が高まってきている^[2]。

技術的な観点、経済的な観点、規制上の観点から課題を挙げる。

・技術的な観点

小型の中性子源では、線束が弱いので、結果を得るために時間がかかる。また、そのために、高速な時間変化をみるような、動的な測定は困難である。

中性子により周囲の構造物やサンプルが放射化する。

・経済的な観点

発生装置が高価であるため、限られた施設でしか利用できない。

施設の利用に時間がかかる。

施設利用料がX線より割高となる。

・規制上の観点

中性子発生装置は強度によらず、特定RI使用者となるため、管理負担が増える。

屋外での使用に制限がある（直線加速器で4MeV以下で橋梁や橋脚は可能）

(2) (1) であげた課題の内、1つを抽出し、その解決策を示す。以下に解答例を示す。ここでは、経済的観点を挙げたが、他の観点で論じてもよい。

今後の中性子利用の普及の観点からは、経済的な観点が最も重要と考える。その解決策を以下に示す。

・小型加速器中性子源の利用

新たな研究においては、精度よりも、中性子が利用できるかどうか試してみたいという需要がある。それに対して、大型施設では、課題申請から利用まで半年以上の時間を要するというデメリットがある。線束が弱いが、安価で、即時に利用のできる施設があれば、研究開発にはメリ

ットがある。理研 RANS^[3]等が積極的に取り組んでいる。

- ・研究用原子炉と加速器施設の効果的な運用

研究用原子炉は設置に時間がかかる、核燃料を扱うため、管理負担が大きいというデメリットはあるが、加速器のような高価な電気代がかからない、安定的に中性子を発生できるというメリットもある。また、JRR-3^[4]の場合、J-PARC^[5]より利用料は安価である。研究用原子炉と加速器施設の効率的な運用により、利用者の負担を抑えることができると考えられる。

(3) (2) であげた解決策のリスクを示す。上述のように、(2) (3) が(1) と矛盾しないように、予め書く内容を大まかに考えておくとよい。以下に解答例を示す。

以下に、上記解決策のリスクと対策を示す。

- ・小型加速器中性子源

小型加速器中性子源のリスクは、投資にみあう成果が得られるかである。小型とはいえ、X線発生装置に比べれば、高価であり、上述のように大型施設に比べて、得られる結果の精度は低い。このため、研究開発が本当に加速できるかは未知数の部分がある。

対策の一つとして、検出器側の高効率化やデータ分析技術の向上があげられる。線束が弱くとも、中性子検出器側の効率が高ければ、結果の精度を上げることができる。中性子フラットパネル等が現在開発中である。また、AI 技術の応用などデータ分析技術の向上により、測定の不確かさの低減も可能と考えられる。

- ・研究用原子炉と加速器施設の効果的な運用

リスクとしては、使用者がどのような場合に原子炉を用いるか加速器を用いるかの判断ができないことが挙げられる。使用者は必ずしも、中性子源の専門家でなく、特に回折実験を多く利用する材料開発技術者が、原子炉と加速器の運用を判断するのは困難である可能性がある。

対策の一つとして、施設にユーザー相談窓口を設けることが挙げられる。施設を利用する前に、中性子源の専門家に相談できるルートは、運用をより容易にすると考えられる。そのような取り組みは既に JRR-3 や J-PARC で試みられており、今後、小型中性子源が普及すれば、全国の中性子源施設と連携して、どのような実験にはどの施設が向いているということをアドバイスできる窓口があれば、ユーザーの経済的負担も低減できると考えられる。

【参考文献】

[1] 中性子産業利用推進協議会ホームページ <http://www.j-neutron.com/>

上記 HP のリンク集より下記ホームページを含む関連ホームページにアクセス可能

[2] 広田ら, "中小型加速器中性子源の構築のための日本加速器学会と日本中性子科学会の連携に関して", 加速器, 15, 2, 69-72 (2018)

[3] 理化学研究所光量子工学研究センターホームページ https://www.riken.jp/research/labs/rap/neutr_beam/index.html/

[4] JRR-3 ユーザーズオフィスホームページ <https://jrr3uo.jaea.go.jp/index.htm>

[5] J-PARC センターホームページ <http://j-parc.jp/c/index.html>

7 おわりに

令和元年度の試験から、選択科目の再編に加え、技術士に求められる資質能力を評価することを考慮して、出題の仕方が変更された箇所がある。受験者には、各問題で問われている資質能力が何であるかをよく理解し、解答する必要が生じている。多くの問題は、現在の原子力・放射線分野の技術的課題への対応や、それらを説明することを問うているように思える。

これらの問題は裏返せば、技術士に問題解決への寄与を求めていると捉えることもできる。既に技術士資格を取得されている方にとっては、十分承知されていることとは思うが、技術士の資質能力の中に継続研さんがある。技術士の方にとっては、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。

冒頭の必須問題にもあるように人材確保は各分野共通の課題となっているが、単に企業、組織の論理に埋没する技術者を増やすことではないと思う。原子力・放射線に携わるものとしては、JCO事故、1F事故の反省を忘れてはならない。忠誠の概念（無批判的忠誠と批判的忠誠の違い）をよく認識し、公益確保の姿勢を貫いていくことが必要だと考えている。

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欲しい。

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、日本原子力学会教育委員会技術者教育小委員会の下に設置された技術士試験対策支援WG委員諸氏及びその依頼を受けて多くの技術士、研究者、技術者に無償で協力を頂いた。各位のご協力に心より感謝する。