解 説**六ヶ所再処理工場の放射線安全について**滝 本 察 春^{*1}

(1990年9月29日受理)

**Radiation Safety Design and Management on Rokkasho Nuclear
Fuel Reprocessing Plant**Satsuharu TAKIMOTO^{*1}

KEY WORDS: ALARA, plant process, radiation protection, monitoring, dose evaluation

1. はじめに

六ヶ所再処理工場は、使用済燃料を年間800トン再処理する能力をもち、国内外の実用可能な最良の技術を採用する計画である。また、六ヶ所再処理工場の設計、建設および運転にあたっては、安全を最優先に進めることとしている。すなわち、ALARAの精神に沿って、施設に起因して受ける一般公衆および放射線業務従事者等の線量当量が、合理的に達成できる限り低くなるよう十分な防護対策を講ずる。

施設設計において、工場で取り扱う放射性物質は、運転条件に対して腐蝕しにくい材料を用いた機器、装置に内蔵され、これらは、鉄筋コンクリートの小部屋に収められ、これをさらに建屋がおおう。その上、それぞれの圧力を建屋、小部屋、装置の順に低くし、装置内の放射能が、直接漏れることがないように配慮するなど、十分な放射能の閉じこめ設計を行っている。

また、放射性物質を含んだ気体および液体を外部へ放出する場合には、放射性物質をできるだけ取り除くこととし、このために放出低減効果が大きく、信頼性のある技術を採用し、合理的に達成できる限り放出放射性物質の低減化を図っている。

以下、放射線業務従事者および周辺一般公衆に対する放射線安全の面から、施設の放射線管理、放射性廃棄物の処理、ならびに周辺公衆に対する線量当量評価について、その概要を述べることにする。

2. 六ヶ所再処理工場の概要

六ヶ所再処理工場は、第1図に示すように、青森県六ヶ所村の弥栄平に位置し、敷地面積388万m²である。

(1) 施設の概要を第1表に示す。

主工程の処理技術については、フランス、動燃事業団において処理実績を有し、信頼性が高いピューレックス法を導入している。

(2) 再処理工程のしくみを第2図に示す。

ここで再処理工程の概要について述べることにする。

① 使用済燃料は、原子炉から取り出し、原子力発電所内の燃料貯蔵プール内で1年以上保管した後、再処理工場に運ばれ、工場内の貯蔵プールに発電所の保管期間と合わせて、4年間以上保管される。

② この使用済燃料は、貯蔵プールからせん断機に送られ、長さ3~4cmにブツ切りされた後、溶解槽で硝酸に溶かされて硝酸溶液になり、被覆材のジルコニウム合金は、硝酸に溶けず、そのまま残る。この硝酸溶液は、分離塔に送られ、被覆材などは、容器に入れて貯蔵庫で安全に保管される。

溶解槽としては、第3図に示すように、水車のような形をした連続溶解槽を用いる。

^{*1} 日本原燃サービス(株); 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号(〒100)

Japan Nuclear Fuel Service Co. Ltd.; 2-2, Uchi-saiwai-cho 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan.

この連続溶解槽は、フランスで長年研究開発実績があり、ラ・アーク再処理工場 UP-3 のプラントで用いら

れ、信頼性が高い。また、処理能力を大きくでき、運転手順も容易であることに加えて、槽内の燃料のインベントリを少なくできる等利点がある。

③ 分離塔では、硝酸溶液に有機溶媒を混ぜる。そうすると硝酸溶液中に溶けていたウランとプルトニウムは、この溶液のほうに移り、ウランとプルトニウムを含んだ溶媒と核分裂生成物を含む硝酸溶液とに分離する。

④ 溶媒中のウランとプルトニウムは、分配塔で、硝酸ウランと硝酸プルトニウムの形に分離され、それぞれの不純物を取り除き、精製後、プルトニウム溶液の方には、等量のウラン溶液を加えた上で、それぞれ脱硝転換を行い、ウラン酸化物およびプルトニウムとウランを

第1表 施設の概要	
再処理能力	年間 800 トン
使用済燃料冷却期間	4 年以上
燃焼度	平均燃焼度 45,000 MWD/トン以下
貯蔵能力	約 3,000 トン・U
貯蔵方式	水・プール貯蔵
再処理主工程処理方式	湿式法(ピューレックス法)

第1図 六ヶ所再処理工場の位置

第2図 六ヶ所再処理工場のしくみ

第3図 溶解槽概要図

1対1に混ぜた酸化物の粉末の形にして、製品貯蔵施設に一定期間貯蔵する。

⑤ 一方、核分裂生成物を含む高レベル放射性廃液は、放射線や水に対して安定した性質をもつガラスに混ぜて高温で溶かし、この溶液を丈夫なステンレス製容器（キャニスター）に流しこんで冷却固化する。

ステンレス製の容器に封入されたガラス固化体は、堅固な建物内の専用施設で、一定期間安全に貯蔵される。ガラス固化体貯蔵施設を第4図に示す。

第4図 ガラス固化体貯蔵設備概要図

(3) 放射能の閉じこめについて第5図に示す。

3. 再処理施設の放射線管理

放射線業務従事者等の放射線防護の基本的考え方は、放射線防護関連法令を遵守することはもとより、管理区域内での不必要な被ばくを防止するとともに、避けられない被ばくについては、合理的に達成できる限り低く保つような放射線防護の諸対策を講ずることとしている。

具体的方法の主要な点について以下述べることにする。

(1) 施設設計において、放射線業務従事者等の管理区

域立入り時間や頻度を考慮したしゃへい設計、汚染区域の拡大を防止する換気設計などの設備を配慮する。

(2) 管理区域は、外部放射線に係る線量当量の高低、空気中の放射線物質の濃度、ならびに床等の表面の放射性物質の密度に起因する汚染の高低等を勘案して、第6図に示すようにレッド、イエロー、グリーンの3区域に

第5図 放射能の閉じこめ

細区分する。通常レッド区域は、立入り不可とし常時立入るのがグリーン区域、メンテナンスなどで立入るのがイエロー区域である。

(3) 放射線管理業務体系について、第2表に示す。管理の主要な考え方は、次のとおりである。

管理区域立入者には、適切な個人モニタを着用させ定期的な測定評価結果をつねに集計し限度内であることを確認する。

管理区域内の主要な箇所には、線量当量率、空気中の放射性物質濃度を測定、監視する設備を設け、異常な被ばくを防止するとともに被ばく低減化対策の一助とする。

管理区域への立入りは、あらかじめ指定された者で、必要な場合に限る。これらは出入管理室で確認するほか、放射線等のレベルに応じた区域設定に基づき、段階的な出入管理と立入制限または施錠などの措置を講ずる。

作業者の被ばく低減対策としては、必要により、局所しゃへいの設置や、グローブボックスあるいはマニピュレータなどの遠隔操作を利用する。また作業の事前措置として、放射線安全教育、訓練を実施し、さらに放射線作業計画をあらかじめ立て、作業中は、必要に応じ線量率、空気中の濃度測定と防護具の着用など、可能な限りの被ばく低減化を図る。

4. 放射性廃棄物処理

(1) 放射性廃棄物の廃棄に関する基本的な考え方

放射性廃棄物の廃棄については、放射性物質の放出に

外部放射線の線量当量率	I5	I4	I3	I2
汚染	($> 500 \mu\text{Sv/h}$)	($\leq 500 \mu\text{Sv/h}$)	($\leq 50 \mu\text{Sv/h}$)	($\leq 10 \mu\text{Sv/h}$)
空気中濃度限度 $(^{106}\text{Ru}; 1 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3)$ $(^{137}\text{Cs}; 2 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3)$ 表面の密度限度 (全 α ; 4 Bq/cm^2) (全 β ; 40 Bq/cm^2)	レッド区域	イエロー区域		
空気中濃度限度の3/10 表面の密度限度の1/10		グリーン区域		
汚染のおそれのない区域				

第6図 管理区域の細区分基準

第2表 放射線管理業務体系図

伴う一般公衆の線量当量が、法令に定める線量当量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低くなるよう以下の観点から放出放射性物質の低減を行う。

- ① 放出放射性物質の低減効果が大きく、かつ、信頼性のある技術を採用する。
- ② 放射性廃棄物の化学的、物理的性状に応じ、各処理設備において最適な技術の組合せを行う。
- ③ 放射性廃棄物をできるだけ施設内にとどめ、適切な形で貯蔵、保管する。

(2) 放射性廃棄物処理方法

再処理施設で発生する放射性廃棄物は、できる限り再処理施設内で貯蔵、管理し、環境に放出するもの以外の放射性物質については、その発生源に応じて減容、焼却、固化等の処理を行い、十分なしゃへい能力を有する廃棄物貯蔵設備に保管廃棄することにより、一般公衆の線量当量の低減化を図る。

気体廃棄物および液体廃棄物として環境に放出する放射性物質については、現在の実用可能な処理技術を考慮し、放出放射性物質量の低減化を図る。

放射性廃棄物処理工程の概要を、第7図に示す。

粒子状放射性物質は、気体側については、発生量に応じて、各廃ガス処理設備において、洗浄塔、デミスタ、高性能粒子フィルタ等を組み合わせて洗浄および濾過により放出量の低減を図る。液体側については、廃液の種類および濃度に応じて、蒸発装置、濾過装置、脱塩装置等を組み合わせて処理し、高レベル廃液あるいは、低レベル廃液として貯蔵することにより、溶液中に残る放射性物質の量を低減化する。なお気体、液体の処理工程で処理しきれない微量の放射性物質については、十分な拡散、希釈能力をもつ放出口から放出することにより、一般公衆の線量当量の低減化を図る。

よう素は、気体状にしてよう素フィルタで吸着除去することが、放出の低減化に最も効果的であるため、溶液

第7図 廃棄物処理工程の概要

中から気相への追い出しを行い、最新の技術によるよう素フィルタにてほとんどのよう素を吸着除去し、環境への放出量を低減する。

希ガスおよび炭素-14 は、農畜産物および生体には濃縮せず、また環境への蓄積がないことから、それらに起因する線量当量が十分に小さく、大気への放出に際しては、十分な希釈効果による濃度の低減化を図る。

トリチウムは、環境中では大部分がトリチウム水として存在するが、挙動が水と同じであり、海産物、農畜産物および生体には濃縮せず、また蓄積がないことから、それに起因する線量当量が小さく、十分な拡散、希釈能力をもつ放出口から放出することにより、一般公衆の線量当量の低減化を図る。

(3) 放射性廃棄物の推定放出量

使用済燃料中に保有する各核種の量を、年間再処理量、800 t・Upr、1日当り再処理する使用済燃料の平均燃焼度 45,000 MWd/t・Upr 以下、冷却期間4年の条件を基に、ORIGEN 2 コードを使用して推定する。この値に各処理工程での除染係数を考慮して放射性物質の放出量を推定する。この場合、高性能粒子フィルタの粒子除染係数は、1段目は1,000、2段目以降は、100 として推定する。

なお、クリプトン-85 および炭素-14 は、使用済燃料中に保有する全量を、せん断処理、溶解廃ガス処理設備を経て主排気筒から放出するものとし、トリチウムは、水の状態で廃液中に移行し、使用済燃料中に保有する全量を海洋放出管を経て放出するものとする。

気体廃棄物および液体廃棄物の環境へ放出される放射性物質の推定年間放出量を、第3表に示す。

5. 放射性廃棄物の放出管理

再処理施設外に放射性の気体廃棄物および液体廃棄物を放出する場合は、次に述べるように厳重な放出管理を行う。すなわち放射性廃棄物の放出に際しては、放出する放射性物質について放出管理の目標値を定め、これを超えないよう努める。

(1) 気体廃棄物の放出管理

気体廃棄物は、フィルタ類を経て主排気筒および換気筒から放出するが、この気体廃棄物の排気中の放射性物質の濃度は、排気モニタリング設備によって監視および測定を行う。

排気中の放射性希ガスについては、排気モニタにより連続して測定、監視する一方、放射性よう素、炭素-14、放射性粒子およびトリチウムについては、排気モニタ付近に連続サンプリングができる排気サンプリング設備を

第3表 放射性廃棄物の推定放出量
気体廃棄物の推定放出量

核種	放射性物質の推定年間放出量 (Bq/y)
Kr-85	約 3.3×10^{17}
H-3	約 2.0×10^{15}
C-14	約 5.2×10^{13}
I-129	約 1.3×10^{10}
I-131	約 5.6×10^{10}
その他	約 1.2×10^{11}

(注) その他核種のうち、
アルファ線を放出する核種
約 3.7×10^8 (Bq/y)
アルファ線を放出しない核種
約 1.2×10^{11} (Bq/y)

液体廃棄物の推定放出量

核種	放射性物質の推定年間放出量 (Bq/y)
H-3	約 1.8×10^{16}
I-129	約 2.6×10^{10}
I-131	約 1.8×10^{11}
その他	約 7.1×10^{11}

(注) その他核種のうち、
アルファ線を放出する核種
約 9.8×10^9 (Bq/y)
アルファ線を放出しない核種
約 7.0×10^{11} (Bq/y)

設置し、定期的に測定する。

排気筒モニタの測定結果は、制御室および必要な箇所に指示、記録するとともに、放射線レベルがあらかじめ設定された値以上になると制御室および必要な箇所に警報を発し、運転員等の注意を喚起する。

(2) 液体廃棄物の放出管理

液体廃棄物は、蒸発装置、濾過装置、脱塩装置などで処理を行った後、低レベル廃液処理設備の海洋放出管理工程から海洋放出管を経て沖合約 3 km の海中に放出する。

これらの液体廃棄物を放出する場合には、あらかじめ放出前貯槽においてサンプリングし、放射性物質の濃度を測定し、放出量を確認して放出する。

6. 環境モニタリング

敷地周辺の一般公衆の線量当量が合理的に達成できる限り低くなるよう、再処理施設には十分なしゃへいを設け、再処理施設からの直接線およびスカイシャイン線による線量当量を十分低くするとともに、気体廃棄物およ

び液体廃棄物の放出に当たっては、前述のとおり、厳重な放出管理を行う。

さらに異常がないことを確認するため、周辺監視区域境界付近および周辺地域において、放射線および放射性物質濃度の監視（以下環境モニタリングという）を行う。

環境モニタリングに係る基本的な考え方は、原子力安全委員会『環境放射線モニタリングに関する指針』に準拠する。

また環境モニタリングを進めるためのモニタリング対象、種類、頻度等具体的方法を策定するに際して、現地の社会環境実態、気象海象等の自然事象を勘案するとともに、放射性物質の移行経路、環境での挙動などを考慮する。

(1) 周辺監視区域境界付近での環境モニタリング

周辺監視区域境界付近にモニタリングポストを設置し、外部放射線に係る線量当量率を常時監視する。モニタリングポストは、60°セクタ内に全方位にわたっており、卓越方位には密に配置するとともに測定値は制御室で常時監視する。モニタリングポストの配置図を第8図に示す。

また、周辺監視境界付近には、TLDによる積算線量計およびダストモニタを設置し、3カ月ごとの外部放射線に係る線量当量、常時空気中の放射性粒子濃度を測定、監視する。

(2) 周辺地域での環境モニタリング

周辺地域での環境モニタリングは、地方自治体と共同で行われる。

モニタリングの分担は、施設近傍が事業者であり、隣接市町村を含む広い範囲にわたって地方自治体が行う。モニタリング結果については、学識経験者よりなる評価委員会で十分な評価を行った上で、公表することになっている。

周辺地域における環境モニタリングは、環境放射線と環境試料の放射能測定、監視に大別される。

① 環境放射線モニタリング

施設立地村および隣接市町村を含む周辺地域に、モニタリングステーションを設置し、環境放射線の連続監視および空気中放射性粒子濃度の連続監視を行う。

また周辺地域には、TLDによる積算線量を配置し、3カ月ごとの外部放射線に係る線量当量を測定する。

モニタリングステーションおよびTLDなど空間放射線測定地点を第9図に示す。

② 環境試料の放射能監視

環境試料の放射能監視は、次のように行う。環境試料

第8図 モニタリング・ポスト設置点

の種類は、海水、海底土、陸水、陸土、米、野菜等の陸上植物、牛乳等の畜産物、魚類、海藻、貝等の海洋生物などであり、現地での収穫量、摂取量等を勘案して選定する。サンプリング、測定分析の頻度は、原則として、3カ月から1年に1回とする。

測定対象核種は、プルトニウム、よう素、セシウム、ストロンチウム等とする。

7. 平常時における一般公衆の線量当量評価

再処理施設から環境へ放出される気体廃棄物および液体廃棄物に含まれる放射性物質によって受ける一般公衆の線量当量は、法令に定める値をこえないことはもとより、合理的に達成できる限り低い値となることを、設計、運転、立地条件との関連において評価する。

線量当量の計算に当たっては、国の指針を適用するとともに、周辺陸域および海域の利用状況等の地域特性を考慮した適切な解析モデルおよびパラメータを用いる。

(1) 大気放出に係る線量当量評価

大気放出される放射性物質により受ける線量当量評価経路は、気体廃棄物中の放射性物質の放射性雲からの外部被ばく、気体廃棄物中の放射性物質の地表沈着による

外部被ばく、気体廃棄物中の放射性物質の呼吸摂取による内部被ばく、農畜産物摂取による内部被ばくなどである。大気放出に係る被ばく線量評価経路を第10図に示す。

放射性物質の大気への放出は、地上高 150 m の排気筒から行われる。この時排気は、20 m/s 前後の速度で吹き出されるため、放射性物質は、さらに高い位置に吹き上げられ、風等により拡散してゆく。この拡散計算から、放射性雲からの外部被ばく、および呼吸摂取による内部被ばくを評価する。さらに拡散した放射性物質は、乾性沈着と降水沈着により、地表および農畜産物に沈着する。沈着した放射性物質が、長期間蓄積するとして、これから受ける線量を地表沈着による外部被ばくとして評価する。また農畜産物摂取による内部被ばくは、農作物に直接沈着した分からの寄与と、地表に蓄積し、根から農作物に吸収された分からの寄与を加え、評価する。

このような4経路の線量当量は、それぞれの経路において最大の線量当量を求めるが、農畜産物摂取による内部被ばくを除く3経路は、一地点において同時に被ばくするものであるため、各地点ごとに、3経路からの線量

第9図 空間放射線等測定地点図

当量を足し合わせた結果が、最大となる地点での線量当量を評価する。農畜物摂取による内部被ばくは、それらを摂取するまでの流通形態が複雑で、受ける放射線量の地域的な分布と評価することが困難なため、この経路における最大の線量当量を評価し、前述の3経路足し合わせによる最大線量と加えることにより、大気放出に係る線量当量として評価する。

(2) 海洋放出に係る線量当量評価

海洋放出される放射性物質により受ける線量当量評価経路は、液体廃棄物中の放射性物質による外部被ばくおよび海産物に移行する液体廃棄物中の放射性物質の摂取による内部被ばくである。

なお液体廃棄物中の放射性物質による外部被ばくは、当該海域における海浜利用、漁業等の実態を考慮の上、漁業漁撈活動における海面からの被ばく、漁網からの被ばく、船体からの被ばくなどである。

また海産物に移行する液体廃棄物中の放射性物質による内部被ばくは、当該海域における漁業実態および敷地周辺の一般公衆の食品摂取状況を考慮のうえ、魚類、海藻類、貝類、頭足類、および甲殻類の摂取を対象として行う。海洋放出に係る被ばく線量評価経路を第11図に示す。

放射性物質の海洋への放出は、海底に設置された放流管により沖合約3km、水深47mの地点で行われる。このとき排液は、ノズルを通じて鉛直上向きに噴出され、周囲の海水を巻き込み混合希釈されながら海面へ向かい、その後、海の流れと乱れにより拡散していく。このような海洋での拡散を、放出端から噴出エネルギーのなくなるまで、すなわち排液と周囲海水との密度差がなくなるまでは、三次元モデルを、それ以降は、平面二次元モデルを用いて、数値シミュレーションによって解析する。

第 10 図 大気放出に係る被ばく線量評価経路

第 11 図 海洋放出に係る被ばく線量評価経路

線量当量の評価対象となる海域の放射性物質の濃度分布を推定するため、六ヶ所村前面海域での海象観測結果に基づいて当該海域の流動を、代表的なパターンに分類し、数値モデルに基づくシミュレーション解析を行う。

この場合、近傍領域における三次元数値シミュレーション解析結果を、遠方領域における濃度分布解析に接続させるため、海洋放出口から放出された廃液が、水平方向に拡散していく領域に到達する位置において、ある濃度、流速、幅および厚さをもった仮想的な放出口を想定

する。すなわち、遠方領域における濃度分布解析は、仮想放出口に近傍領域における三次元数値シミュレーション解析結果から得られる濃度、流速、幅および厚さを初期条件として与えることにより行う。

評価海域としては、当該海域における漁業実態に基づき、漁場として指定されておらず、漁業活動が営まれていない範囲および放出口の位置を考慮のうえ、実効線量当量が最大となる地点を選定する。

海洋放出に係る線量当量の計算は、それぞれの経路ご

との対象海域での年間平均濃度を、数値シミュレーションの結果から求め、海産物摂取による内部被ばくは、濃縮係数法により、また外部被ばくは、現地漁撈実態調査結果より算出する。これらの二経路からの線量は、被ばくが重複する可能性を考慮して、足し合わせて、海洋放出に係る線量当量として評価する。

(3) 評価結果

再処理施設から放出される気体廃棄物および液体廃棄物中の放射性物質による成人の線量当量は、実効線量当量で年間 0.05 mSv 以下であり十分小さい。

このことは、環境中に放出された放射性物質が、現地の気象、海象等の自然条件の下で、どのように移行、沈着していくかを解析した上で、長期蓄積、食物連鎖などを安全側に仮定して受ける線量を求めていることから、十分な安全確保がなされていると考える。

なお、呼吸率、食品摂取量および実効線量当量換算係数を考慮した年齢グループ別の実効線量当量の成人に対する割合を計算した結果成人の実効線量当量を 1 とした場合、幼児については、約 1.2、乳児については、約 1 の割合である。