

フィンランドにおける放射性廃棄物管理の経験に基づく安全・信頼性・技術の統合

Sami Hautakangas*1

フィンランドの放射性廃棄物の管理は、長い歴史の中で培われた原子力の知識・経験に基づいて、安全かつ効率的に実施されており、規制当局を筆頭に住民から高い信頼を得ている。廃棄物管理に関する技術は、固型化プラント、液体廃棄物の減容化、最終処分、廃止措置、地層処分の実規模原位置実証試験などの各フェーズで開発されている。

Keywords: Safety, Reliability, Solidification plant, NURES®, Final disposal, Decommissioning, FISST

1 はじめに

フィンランドのエネルギー需要の増加は、製造業の発展を中心とした急速な工業化によって促進された。増大するエネルギー需要を満たすため、フィンランドの原子力発電は1977年に始まり、最初の原子力発電所が、Fortum Power and Heat社（以下、「Fortum社」という）によって、ロヴィーサのヘストホメルン島で操業を開始した。フィンランド国内では、現在、ロヴィーサで2基（Fortum社：Fig. 1）、オルキルオトで2基（TVO社）が操業している。

この発電所サイトでは、低中レベル放射性廃棄物の処分場を建設・操業している（ロヴィーサ処分場：Fig. 2、オルキルオト処分場：Fig. 3）。また使用済み燃料の地層処分は、オルキルオトでPosiva社が世界に先駆けて建設を開始している（Fig. 3）。

夏期セミナーでは、Fortum社とPosiva社による放射性廃棄物管理の事例や計画を中心として、安全・信頼性・技術の統合をテーマに講演した。

2 原子力発電所と放射性廃棄物処分場の安全

原子力発電所の設備利用率（Unit Capability Factor）は、安全で効率的な操業を示す指標である。Fortum社の操業するロヴィーサ原子力発電所は、世界のPWRの原子力発電所の平均（近年では約85%）に比べて常に高い水準にあり、90～95%の設備利用率を維持している（Fig. 4）。このことは、原子力に関して高い熟練度を持つことを意味している。

フィンランドでは、原子力発電が開始された初期の段階から「汚染者負担の原則」が規制で定められており、電力事業者が敷地内の中間深度の岩盤内で低中レベル放射性廃棄物の処分場を建設・操業している。放射性廃棄物処分については、政府（雇用経済省）から許認可を受け、規制当局（STUK）によるモニタリングを受けて、事故なく安全に操業している。

長年にわたる安全な操業の陰には、事業の各フェーズにおける技術開発の裏付けがあり、そのような安全と技術を背景として公衆の信頼を得ている。

以下に、信頼性と技術についてそれぞれ述べていく。

Integration of safety, reliability and technology based on experience of nuclear waste management in Finland by Sami Hautakangas
(Sami.Hautakangas@fortum.com)

*1 フォルツム パワー アンド ヒート社

Fortum Power and Heat Oy

POB 100, FI-00048 FORTUM, Keilaniementie 1, Espoo, Finland
本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第34回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容を加筆・修正したものである。



Fig. 1 Loviisa NPP (Nuclear Power Plant)



Fig. 2 Loviisa Repository in Loviisa NPP Site

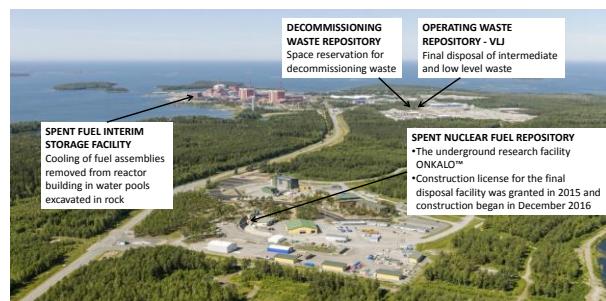
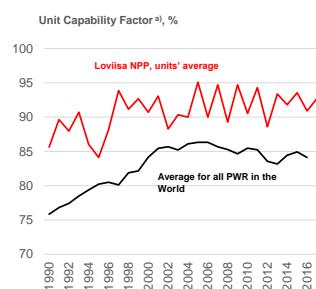


Fig. 3 Complete Nuclear Waste Management on Olkiluoto



a) The Unit Capability Factor shows what could have been the annual electricity generation expressed in the percentage of the energy generation if the unit was operated continuously at full power, if there were no any limiting factors out of the control of plant management.

Fig. 4 Loviisa NPP's high performance

3 地層処分に関する議会の議論と公衆の信頼

使用済み燃料の地層処分は、2001年5月18日の国会にて、賛成159票、反対3票、欠席37票で承認され、その際に次の3点が示された。

- ・最終処分を目指すことは、単に中間貯蔵に頼るよりも優れた解決策である。
- ・廃棄物キャニスターの回収可能性のオプションを維持しなければならない。
- ・現世代は放射性廃棄物の責任を負わなければならない。

それに先立ち、オルキルオトの地元自治体ユーラヨキ自治体評議会では、2000年1月に賛成20票、反対7票で使用済燃料の地層処分について受入を決定している。

放射性廃棄物処分に関する公衆の信頼を示す2件の調査結果をFig. 5, Fig. 6に示す。

Fig. 5は、フィンランドエネルギー協会が1983年から2016年に実施した年次調査の結果で、“放射性廃棄物は、フィンランドの母岩の最終処分場に安全に格納することができる、ということに、あなたは同意しますか？”という問い合わせに対する回答である。どちらとも言えない（Difficult to say）は20~30%でほぼ一定であるが、完全に同意（Agree completely）、やや同意（Somewhat agree）の肯定的な考え方方が1983年の14%から2016年には31%まで増加し、一方でやや反対（somewhat disagree）、完全に反対（Disagree completely）が1983年に過半数の57%から2016年には43%まで減少している。

Fig. 6は、放射性廃棄物管理に関する様々な当事者に対する公衆の信頼をしめす2017年の調査結果で、上段がピュハヨキ（Fennovoima社による北西部の新しいサイトの自治体）と下段がユーラヨキ（オルキルオトのサイトの自治体）における住民の意見である。

最も信頼されているのは規制当局のSTUKで、約80%が“信頼できる”を選択（以下、“信頼度”という）しており、事業者と雇用産業省が30~60%程度、政府がそれよりもやや低い信頼度となっている。事業者については、それぞれの地元の自治体（Posiva社、TVO社はユーラヨキ、Fennovoima社はピュハヨキ）で高い信頼度となっている。また、NGOの信頼度は20%以下となっている。

総じて、規制当局の極めて高い信頼度が特徴的であり、それを基盤として、事業の進展とともに地層処分に関する肯定的な考え方方が増加し、地元の住民の信頼を得ていることにつながっていると考えられる。

4 放射性廃棄物管理に関する技術

4.1 ロヴィーサ原子力発電所における廃棄物の管理

ロヴィーサ原子力発電所における廃棄物の管理のフローをFig. 7に示す。

放射性廃棄物は、まず放射能のレベルで区分され、固体廃棄物は鋼製ドラム缶、イオン交換樹脂とスラッジは固型化したうえでロヴィーサ処分場に最終処分される。液体廃棄物は蒸発・濃縮して、NUREES®（the NUclide REmoval

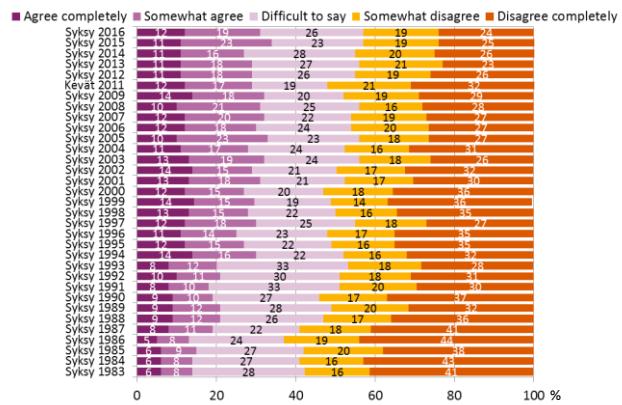


Fig. 5 Annual poll by the Finnish Energy association 1983 – 2016 (Nuclear waste can be safely stored in a final repository in the bedrock of Finland – do you agree?)

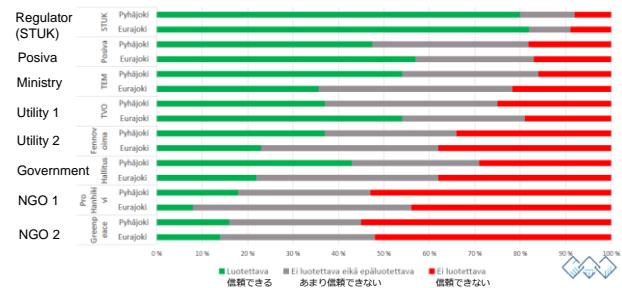


Fig. 6 The public trust in different actors in questions concerning nuclear waste management (Opinions of residents in Eurajoki and Pyhäjoki municipalities in 2017)

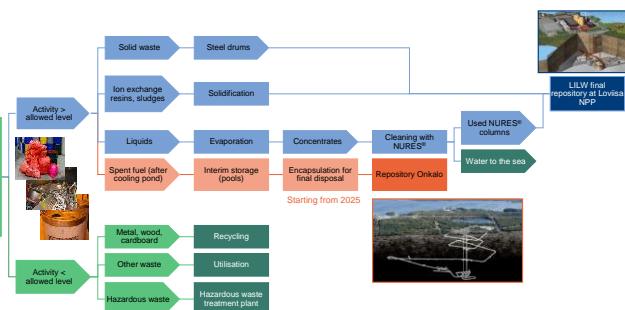


Fig. 7 Waste management at Loviisa NPP

System) で核種を除去した後に海へ放流、その際、吸着材に凝集された廃棄物はコンクリート容器に収納してロヴィーサ処分場に最終処分される。使用済み燃料は中間貯蔵の後、廃棄体の製作を経てオルキルオトで地層処分となる。また放射能レベルの小さい廃棄物はリサイクルや再利用となるが、放射線以外のハザード廃棄物については処理プラントへ送られる。

4.2 ロヴィーサ原子力発電所の固型化プラント

ロヴィーサ原子力発電所の固型化のプロセスをFig. 8,

固型化プラントを **Fig. 9** にそれぞれ示す。

Fig. 8 の固型化のプロセスは、まず液体廃棄物がタンクで貯蔵され、次に固型化プラントでセメント、高炉スラグなどが添加されて、中間貯蔵の後、最終処分となる。

Fig. 9 の固型化プラントは独立したユニットであり、50年を超える発電所の操業中、使用済み燃料の廃炉及び中間貯蔵中にすべての液体廃棄物を処理するように設計されており、各プロセスは制御室で操作する。

Fortum 社で開発されたセメントマトリックスは、従来のマトリックスの2倍以上の効率を有し、固型化した製品の廃棄物含有量は40%～50%となるが、コストは、従来のセメント固化と同様に抑えられている。1980年にレシピ開発が開始され、レシピの完成まで作業が継続する。マトリックスの品質を低下させることなく、55%以上の廃棄物をターゲットとしている。マトリックスを地下水にさらす試験では、マトリックスが4年後に弱くならないことを示している。この固型化のプロセスは、すべてのタイプの低中レベル廃棄物に適している。

4.3 NURES®による放射性核種の除去と廃棄物の減容化

Fortum 社では、放射能の汚染水の浄化のために NURES®を開発した。NURES®は、液体廃棄物から Cs, Sr, Co を除去するため、高選択性のイオン交換材料を有するシステムである (**Fig. 10**)。

NURES®は、他の吸着材に比べて高い除染係数を有し、洗浄された液体の放射能レベルが低い。また異なる液体特性(高～低 pH 及び高塩濃度)に対して有効である。NURES®は、液体廃棄物を高度に減容化できるので、貯蔵・最終処分を含めたトータルコストを削減できる。現在、福島第一原子力発電所の汚染水処理を担う多核種除去設備 (ALPS) を含めて、世界の13ヶ国以上で使われている。

4.4 ロヴィーサ処分場での最終処分

ロヴィーサ原子力発電所で発生した低中レベル放射性廃棄物は、同じ敷地内の中間深度の岩盤内に建設されたロヴィーサ処分場で最終処分となる (**Fig. 11**)。

運転廃棄物の低レベル放射性廃棄物は現在操業中であり、液体廃棄物を固型化した中レベル放射性廃棄物の処分空洞は建設が完了している。また廃止措置廃棄物のための最終処分のエリアは、まだトンネル掘削を行っていない。

Fortum 社は、低中レベル放射性廃棄物の最終処分場の設計、ライセンス供与、コスト分析、処分場とその環境の長期評価、安全評価を実施している。放射能レベルの低い廃棄物と高い廃棄物を同じ中間深度の処分場の異なる場所に埋設することが特徴である。この処分場は、坑道を埋戻して閉鎖した後はメンテナンスフリーとなり、国の管理に移行する。原子力発電所の敷地内の場所のため、最小限の努力で、低中レベル放射性廃棄物処分に対する公衆の容認を得られたものと考えている。

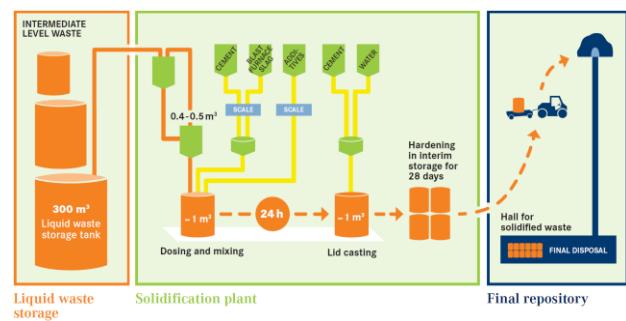


Fig. 8 Solidification process at Loviisa NPP

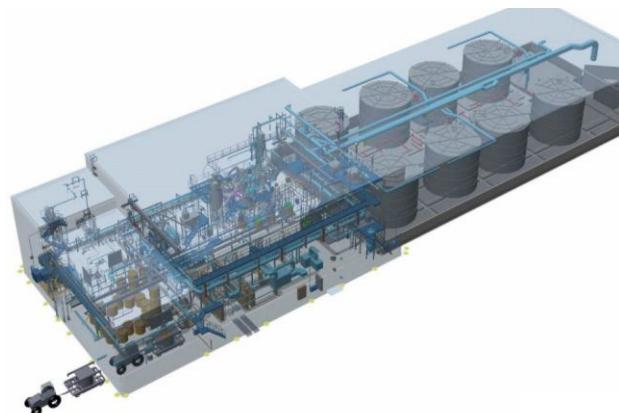


Fig. 9 Solidification plant at Loviisa NPP

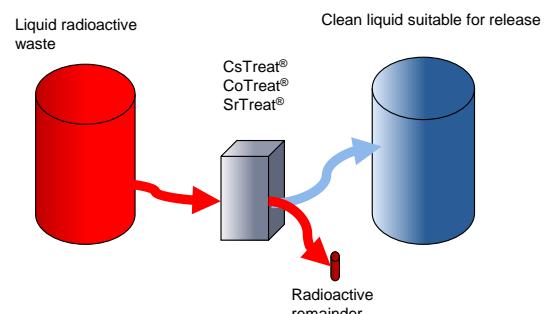


Fig. 10 Solution for purification of radioactive liquid waste by NURES®

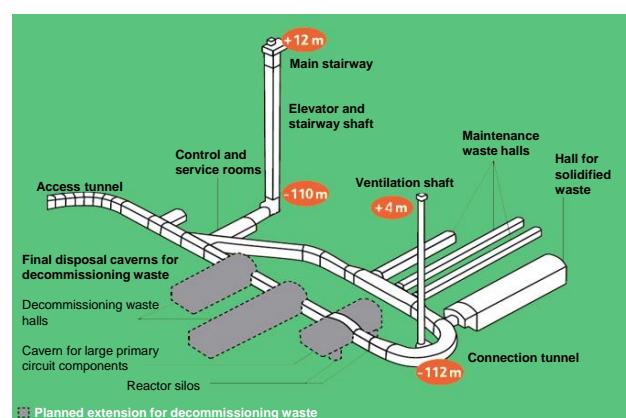


Fig. 11 Loviisa Repository
(Final repository for LILW at Loviisa NPP)

4.5 ロヴィーサ原子力発電所の廃止措置計画

ロヴィーサ原子力発電所の廃止措置の考え方を **Fig. 12** に示す。

Fortum 社では、ロヴィーサ原子力発電所の廃止措置の戦略、ライセンス供与、廃棄物管理計画、廃棄物インベントリー、作業計画とコスト見積り、安全評価、放射線量率の推定、資源計画を実施している。

ロヴィーサ原子力発電所では、原子炉は切断することなく、そのままロヴィーサ処分場のトンネル内を運搬して、コンクリートで囲った原子炉サイロ内に定置し、最終処分とする計画である。放射化金属は原子炉の中に投入し、コンクリートを充填する。機械・設備類もそのまま運搬して最終処分とするが、発電所のコンクリート構造物は切断する計画である。

廃棄物の回収、処理から最終処分までのプロセス全体の最適化（例えば、除染と処分間のコストの最適化）を図っており、費用効率のよい廃止措置の方法となっている。また、高機能の焼却による有害廃棄物のリサイクルと安全な処分を行っていく計画である。

4.6 地層処分の実規模原位置実証試験

Posiva 社が ONKALO™ で実施している実規模原位置実証試験（Full Scale In-Situ System Test, 以下 “FISST” という）は、デモンストレーションエリアの深さ 420 メートルに建設されている（**Fig. 13**）。

Posiva 社では、次のものを対象として、人工バリアシステム構成要素の設計、設置および包括的な監視を行っている。

- ・銅製キャニスター 2 個（燃料崩壊熱に相当する加熱を伴う）
- ・2 つの処分坑の緩衝材
- ・約 50m の埋戻し
- ・定置トンネルのプラグ

FISST の人工バリアシステム構成要素の設置スケジュールについて、以下に示す。

・設置準備完了	2018/5/28
・最初の緩衝材の設置	2018/5/29
・最初のキャニスターの設置	2018/5/31
・埋戻し材の設置	2018 年 6 月末に開始
・プラグの設置	2018 年の年末まで

この後、地層処分の安全性の説明のために、実証試験を進めていく計画である。

5 まとめ

フィンランドでは、原子力産業の長い歴史とともに、世界に先駆けた豊富な原子力の知識・経験に基づいて、発電から廃棄物の処理、処分まで一貫したサービスを安全かつ効率的に実施している。

規制当局である STUK が住民から極めて高い信頼を得ていることを背景に、処分の事業に対して地元の住民の信頼

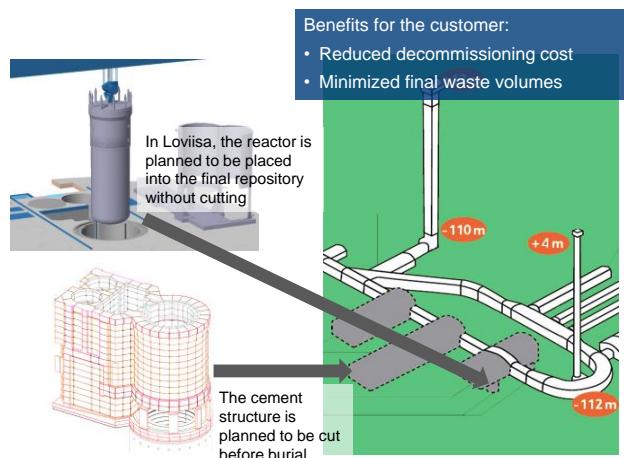


Fig. 12 Decommissioning planning for Loviisa NPP

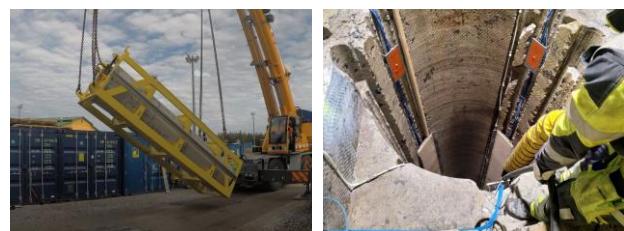


Fig. 13 Full Scale In-Situ System Test in ONKALO™

を得て事業を展開している。

放射性廃棄物の管理に関して、固型化プラント、NURES®による放射性核種の除去と減容化、最終処分、廃止措置、地層処分の FISST とそれぞれのフェーズで安全かつ効率的な技術の開発が行われている。

謝辞

このような講演の機会を与えていただいた日本原子力学会バックエンド部会の運営小委員会、講演と講演再録の和訳で協力いただいた戸田建設株式会社に感謝します。