5-3 敷地内貯蔵と敷地外貯蔵

1. はじめに

使用済燃料は、再処理あるいは処分されるまでの一定 期間、貯蔵される。本節では、貯蔵方式、国内外の貯蔵 の状況及び貯蔵に係る課題と対策について概説する。

貯蔵方式の分類

使用済燃料の貯蔵には以下のような方式がある。

(1) 敷地内貯蔵と敷地外貯蔵

使用済燃料を原子力発電所の敷地内または敷地外に貯 蔵する場合がある。第1図に、発電所から発生した使用済 燃料の流れと、発電所の敷地内貯蔵と敷地外貯蔵の位置 づけを示す。敷地の内外に貯蔵する選択は、国や事業者 の固有の条件により異なる。また、敷地内・外貯蔵の一 般的な長所、短所を第1表に示す。



第1図 使用済燃料(SF)の流れにおける敷地内・外貯蔵

	第1表	表 使用済燃料の敷地内	•	外貯蔵の主な長所、	短周
--	-----	-------------	---	-----------	----

	長 所	短 所	
敷地内	・敷地外輸送の回数、距離を	・貯蔵量を制	
貯蔵	最小化可能。	限されるこ	
	・炉と共通管理可能。	とがある。	
敷地外	・複数サイトの使用済燃料を	・立地点を得	
貯蔵	大量、集中的に管理可能。	る必要。	
	・経済性が向上。		

(2) 湿式貯蔵と乾式貯蔵

使用済燃料を水プール内で貯蔵する方式を湿式貯蔵と 呼び、発電後5-10年間は使用済燃料の発熱量が高いので、 通常、湿式貯蔵により冷却を行う。使用済燃料集合体の 配置をラック、バスケット等で制限することにより未臨 界性を確保し、必要に応じて中性子吸収材を利用する。 また、プール水による除熱の維持、遮蔽水深の維持等が 考慮されている。

使用済燃料を水プール内で冷却貯蔵後、あるいは水プ

ールが満杯になる前に、キャスクやキャニスタと呼ばれ る貯蔵容器に小容量(たとえば約10tU)ごとに乾式貯蔵 する。容器内は、通常、熱伝導性の良いヘリウムなどの 不活性ガス雰囲気にする。

(3) 貯蔵容器(金属キャスク、キャニスタ等)

乾式貯蔵に用いられる容器には、金属キャスクとキャ ニスタがある。金属キャスクは元々使用済燃料を輸送す るために開発、実用化されたが、使用済燃料の貯蔵専用 または輸送・貯蔵兼用にも使われる。この場合、閉じ込 め性能を監視するため蓋は二重構造で、キャスク内は負 圧である。金属キャスクはそれ自体が閉じ込めや遮蔽の 機能をもつ。一方、キャニスタは使用済燃料を閉じ込め るステンレス鋼製の薄肉容器である。この場合、遮蔽は コンクリートキャスク等が機能分担する。

なお、地震時の安定性や使用済燃料の装荷の容易性等 を考慮して貯蔵容器を横型に設置する場合と、地震を考 慮する必要のないサイト条件や敷地面積の有効活用等の 観点から貯蔵容器を縦型に設置する場合がある。

3. 我が国における貯蔵の状況

我が国では、1995年から東京電力福島第一原子力発電 所で、貯蔵専用金属キャスクによる乾式貯蔵施設(第2図) が運転されている¹⁾。貯蔵建屋は全長71m、幅30m、高さ22m である。本施設は、元々船待ちのキャスク保管庫として 設置された経緯からキャスクは横置きである。2012年現 在、9基(約73tU)のキャスクを横置き貯蔵し、耐震の観 点から床に固縛している。2011年3月11日の震災時にも、 キャスクは大きな被害を受けなかった。



第2図 東京電力のキャスク貯蔵施設 (東電パンフレット1992, 1996)

日本原子力発電東海第二発電所では、2001年から貯蔵 専用金属キャスクによる乾式貯蔵施設(第3図)が運転さ れており、24基(約250tU)まで貯蔵できる。キャスクを 縦置き貯蔵(床に固縛)している。貯蔵建屋は全長54m、 幅26m、高さ21mである。



第3図 日本原電のキャスク貯蔵施設 (原電東海パンフレット2001)

中部電力では、浜岡原子力発電所に輸送・貯蔵兼用金 属キャスクによる乾式貯蔵施設(約700tU)の設置計画が ある(第4図)。



第4図 中部電力のキャスク貯蔵施設イメージ図 (中部電力プレスリリース2008)

第5図は、青森県むつ市で建設中の中間貯蔵施設(敷地 外)のイメージ図である。貯蔵建屋は全長130m、幅60m、 高さ30mで、3,000tUの使用済燃料を輸送・貯蔵兼用キャ スクで貯蔵する。最終的には5,000tUの使用済燃料を最長 50年間貯蔵する。



第5図 むつ市に建設中の中間貯蔵施設のイメージ

- 4. 世界の貯蔵の状況
- 4.1 米国1)

第6図に、米国での貯蔵施設の立地と主な乾式貯蔵方式 を示す。2010年11月の時点で、全米63サイト(サイト固 有認可15サイト、一般認可48サイト)で使用済燃料の独 立貯蔵施設(ISFSI: Independent Spent Fuel Storage Installation)が運転中である。1986年6月に乾式貯蔵を 開始して以来、作業員、公衆および環境に影響を及ぼす 放射性物質の漏れはなく安全に貯蔵が行われている。





左上から時計回りに、 金属キャスク (R. Einziger ISSF2010) コンクリートキャスク (AsCaitolTimes2011) 横型サイル(IAEA web Nuclear

Fuel Cycle & Waste

Tech.)。 第6図 米国における使用済燃料貯蔵施設の立地点と 主な貯蔵方式例

4.2 ドイツ1)

ドイツ国内では、当初敷地外キャスク貯蔵施設を建設、 操業した(第7図(上))。しかし、使用済燃料輸送への公 衆の反対が根強く、2002年の原子力法改正以降、使用済 燃料の中間貯蔵は各発電所の敷地内貯蔵で実施されるこ ととなった。また、事業者は緊急避難的な対策として、 水平横置き型の暫定保管庫による貯蔵を実施している。 第7図(下)に暫定保管庫の概要を示す。遮蔽機能を強化す るため、貯蔵庫には耐候性のあるプレハブ方式のコンク リート部材が用いられている。この貯蔵庫は容量が小さ く建設期間も1~2カ月と短い。また、敷地の制約から、 世界で唯一のトンネル貯蔵方式が敷地内で採用されてい る。第8図に、トンネル方式の概要を示す。2本のトンネ ル内に貯蔵ホールを設け、立杭を通じて除熱を行いトン ネルの岩盤に遮蔽機能を持たせている。





第7図 敷地外キャスク貯蔵施設(ゴアレーベン)(上)と敷地 内キャスク暫定保管庫(下)(W. Sowa ISSF2003)



第8図 トンネル方式(ネッカーウエストハイム発電所) (H. Voelzke, PATRAM 2010)

4.3 スウェーデン¹⁾

第9図に、オスカーシャム原子力発電所に隣接する 使用済燃料中央貯蔵施設(CLAB)(敷地外)の概念を示す。 地下が強固な岩盤であることから、天然の遮蔽、閉じ込 め機能を有する地下式のプール貯蔵施設となっている。

1985年に運転を開 始し、現在の貯蔵 容量は 8,000tU で、 2009年時点で 5,000tUの使用済 燃料が中間貯蔵さ れている。



第9図 地下プール貯蔵施設 (CLAB)

4.4 スイス ¹⁾

第10図に、スイスのビューレンリンゲン村の原子力研 究所(Paul Sherrer Institut)に隣接する金属キャスク中 間貯蔵施設(ZWILAG)(発電所敷地外)を示す。本施設は、 スイスの4つの電力会社が共同出資し、2001年に運転開始 した。最大200基のキャスクを貯蔵できる。本施設では、 使用済燃料のほか再処理高レベル廃棄物も貯蔵する。貯 蔵建屋は全長26m、幅41m、高さ18mである。



第10図 敷地外金属キャスク中間貯蔵施設(W. Heep ISSF2010)

4.5 スペイン¹⁾

第11図に、スペインにおける貯蔵施設の計画を示す。 貯蔵の許認可年数は40年(初期20年+更新20年)である。 2002年よりTrillo発電所で金属キャスク貯蔵施設が、 2009年よりJose Cabrera発電所でコンクリートキャスク 貯蔵施設が、運転を開始している。また、2015年までに、 さらに2サイトで運転開始が予定されている。さらに、 一定期間敷地内貯蔵した後、敷地外集中貯蔵施設に輸送 し、収納缶方式に詰め替えボールト貯蔵(設計貯蔵期間 100年)を行う構想であり、2016年頃の建設を予定してい る。



(敷地外集中貯蔵施設の設計概念例) 第11図 ボールト貯蔵施設の運転・計画状況

5. 金属キャスク貯蔵の課題と対策

中間貯蔵に用いられる金属キャスクについて、長期間 貯蔵中の密封性能に対する健全性評価として、金属ガス ケットの長期密封性能試験²⁾が行われている。

(1)実物大の金属キャスク蓋部モデル2体を用いて、約19



第12図 実物大の金属キャスク蓋部モデル



第13図 金属ガスケット漏えい率測定結果

年間の金属ガスケットの長期密封性能に関する実証デー タが取得された(第12図)。金属キャスク蓋部モデル2体 の二次蓋金属ガスケットの漏えい率は、試験中ほぼ一定 の値となっており、長期密封性能が維持されることが示 された(第13図)。これらデータを基に、ラーソン・ミラ ーパラメータ(LMP)を用いて密封寿命が評価された。



LMP = T X (C + log(t)) 式(1) ここで、T:温度(K)、t:時間(hour)、C:材料定数(16) LMPを用いた評価から、金属ガスケットの密封寿命とガ スケット初期温度の関係が明らかにされた(第14図)。本 結果から、ガスケット初期温度(設計条件)に応じて密 封寿命が容易に推定可能となった。

(2)応力緩和解析により金属ガスケットの密封性能が評価された。金属ガスケットの密封性能を解析評価するため、圧縮クリープ試験により新たにガスケット外被材(アルミニウム)のクリープ構成式が作成された。その構成式を組み込んだ解析で、1/10縮尺試験体での実験結果との比較の結果、評価手法の妥当性が検証された。さらに、長期密封試験に使用した実物大金属キャスクを対象に、クリープ解析の結果、初期温度139℃で60年間の貯蔵期間に対し、金属ガスケットの残留反発力が漏えい喪失限界以上残っており、密封が維持されることが明らかとなった(第15図)。本研究は原子力安全・保安院の受託研究として実施された。



第15図 金属ガスケットの応力緩和解析結果の例

6. コンクリートキャスク貯蔵の課題と対策

自然換気を利用したコンクリートキャスク貯蔵施設で は、使用されるキャニスタ表面の塩化物応力腐食割れ (SCC)による密封機能の喪失がない設計や経年変化の検 査技術の実証が残された課題であり、以下にこれら課題 に係わるトピックスを示す。

6.1 キャニスタのSCC評価手法の開発^{3),4),5)}

SUS304L等を使用したキャニスタについて、SCC発生防 止基準およびき裂進展管理基準による密封機能評価シナ リオが構築され、設計貯蔵期間(60年)に対してキャニ スタが成立する環境条件や溶接残留応力低減によるSCC 抑制技術が提案されている。第16図に、貯蔵年数とキャ ニスタ表面に付着する塩分量との関係を示す。SUS304L材 のSCC発生限界塩分濃度は0.8g/m² as C1であり、気中塩分 濃度が0.5mg/m³を下回る環境であれば、SUS304L製キャニ スタを用いたコンクリートキャスク貯蔵(60年)の成立 性が期待できることになる。 また、キャスク内の冷却流路狭隘部を想定した、レー ザー誘起ブレイクダウン分光法(LIBS)によるキャニス タ表面塩分濃度計測方法の評価が行われ、C1濃度0.05~ 1.0g/m²の範囲で定量計測の実用化に向けた原理が実証さ れた。定期的監視への応用技術として有望である。 6.2 キャニスタ蓋溶接部検査技術の開発⁶⁾

キャニスタ蓋溶接部に対して、原子力安全・保安院の 技術要件では、米国の検査手法である液体浸透法試験 (PT)に加え、超音波探傷(UT)検査が求められている。オ ーステナイト系ステンレス鋼キャニスタ蓋溶接部の欠陥 検査としてフェーズドアレイ(PA)法のUT検査手法を適 用した試験結果に基づき、蓋溶接部に内包される欠陥の 画像化による探傷方法が提案された。第17図と第18図に、 溶接不良模擬欠陥に対する検出の概要を示す。溶接欠陥

(放電加工欠陥と溶接不良欠陥)を挿入した実径大の SUS304L製キャニスタ蓋モデルを製作し、自動化したPA法 UT試験を実施した。その結果、構造評価では溶接深さの 1/4 (8mm)以上に発生する欠陥の検出が要求されている が、UT検査では深さ2mmから検出可能であることが確認さ れた。また、初層に発生した融合不良の欠陥(図中の赤 丸)についても識別可能である。一方、ブローホールの ような小さい球状欠陥(図中の黄丸)に関しては、2mm以 上であれば識別可能である。



第16図 貯蔵年数とキャニスタ表面付着塩分量



第17図 キャニスタ蓋溶接部におけるUT検査



第18図 溶接不良模擬欠陥の蓋上面からの検出結果

6.3 塩分付着予測7)

SCCの環境対策では、海岸から飛来する海塩粒子のキャニ スタ表面への付着量を定量的に評価し、応力腐食割れの 発生や進展による閉じ込め性能喪失の有無を評価する必 要がある。海塩粒子を含んだ冷却空気は、コンクリート キャスク内に設置されているキャニスタの表面に沿って 下から上へ流れる。従って、キャニスタ表面への塩分付 着量を評価するためには、垂直姿勢かつ表面と平行に流 れる状態での評価が重要である。さらに、キャニスタ表 面が高温であることや海塩粒子が非常に小さいことにも 注意が必要である。そのため以下の試験を行ったが、本 研究は原子力安全・保安院の受託研究として実施した。 (1)室内試験

垂直風洞内にノズルで塩水を噴霧し、風洞に取付けた 金属試験片(SUS304製)への付着塩分量を測定した結果、 以下が明らかになった(第19図)。

- ①風洞を垂直に設置し空気の流れを垂直にした場合、
- 付着量は重力沈降による付着が生じる水平姿勢に比 べ、約1/28小さい。
- ②垂直姿勢の試験で、付着量は温度が高いほど減少し た。
- ③垂直姿勢の試験で、付着量は空気流速が大きいほど 乱れが大きくなり、増加した。

なお、室内試験ではノズルによる塩分制御が困難なため、 実環境試験での気中塩分に対し約550倍濃度の高い加速 試験になっている。

(2)実環境試験

室内試験では塩分濃度が非常に高い条件のみの試験と なったため、別途、実環境での塩分付着量測定試験を実 施した。試験装置は千葉県銚子市にある日本ウェザリン グテストセンター銚子暴露試験場(海岸線から4km)に設 置された。実環境では、気中塩分濃度が非常に小さいこ ともあって、塩分付着量の増加は非常に小さかった。



第19図 室内と実環境における付着塩分量測定結果

6.4 貯蔵施設への塩分流入低減技術の開発8)

自然換気を利用した貯蔵施設では、コンクリートキャ スク内部に入る海塩粒子を低減することによるSCC対策 も有効な選択肢である。そこで、貯蔵施設の除熱性能に 影響を与えない低圧力損失で、塩分捕獲率の高い塩分流 入低減装置が開発された。実環境下での長期にわたる性 能評価データが取得され、その有効性が確認されている。 第20図に、塩分流入低減装置のコンクリートキャスクへ の適用例を示す。神奈川県横須賀市の海岸近傍での塩分 環境に対し、塩分粒子捕獲板(長さL=0.5m)の数量(15 枚)を最適化した低減装置を用いた場合、塩分捕獲率は 40%、圧力損失増加による排気温度上昇は1℃以下と小さ くなっており、今後の実用化が期待される。



第20図 塩分流入低減装置のコンクリートキャスクへの 適用例

- 7. 使用済燃料貯蔵の長期健全性
- 7.1 IAEAにおける長期貯蔵の指針類策定活動 使用済燃料の長期貯蔵は世界的な動向と考えて、次の 指針作りが行われている。
- 100年までの長期貯蔵のセーフティケース指針 輸送・貯蔵兼用金属キャスクの貯蔵後輸送のセーフティケースを作成する際の指針となるものである。

② 100年を超える超長期貯蔵の指針

使用済燃料貯蔵施設(湿式・乾式の両方を対象とする) で超長期貯蔵する場合の材料劣化、設計要件、経年劣化 対策、オーバーパック等の考え方、制度的な管理、一般 公衆の信頼性、規制の考え方等について、指針を作成し ている。

7.2 120~300年の長期貯蔵の米国研究プロジェクト

米国では、政権交代により、ユッカマウンテンでの処 分プロジェクトが頓挫し、使用済燃料の長期貯蔵へ政策 がシフトしつつある。使用済燃料の長期貯蔵対策を着実 に推進するため、EPRI主導で使用済燃料の長期貯蔵研究 プロジェクト(ESCP)を2010年度から着手している。こ れまでに、米国政府機関(DOE, NRC)、国立研究所、電力、 原子力産業界の代表からなるESCP運営委員会を中心に、 2020年度からの長期貯蔵実証試験の開始に向けて必要な 検討や、長期貯蔵の安全評価において不足する知見の評 価(ギャップ解析)を実施中である。米国の国立研究所 (PNNLやSNL等)は、貯蔵期間は120年以上(実力評価期間 は300年)、貯蔵後の再取出性と複数回にわたる貯蔵後輸 送(特に、高燃焼度燃料)の保守的な安全確保を前提に ギャップ解析を行い、実証試験等により解決が必要な課 題を抽出している。

参考文献

- 1) IAEA Joint Conventionに基づく、各国国別報告書 http://www-ns.iaea.org/conventions/results-mee tings.asp?s=6&l=40
- 2) 電中研 地球工学研究所・環境科学研究所「研究概 要-2009年度研究成果-」
- 6井他「コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究」電中研報告N10035(2010).
- (4) 亘他「コンクリートキャスクのキャニスタ表面付着 塩分量評価(その2)」電中研報告N11028 (2012).
- 5) 江藤他「レーザーを用いたキャニスタ付着塩分計測 技術の開発」電中研報告H11020(2012).
- 6) 後藤他「コンクリートキャスク方式による使用済燃 料貯蔵の実用化研究」電中研報告N11057(2012).
- 1 亘、三枝「コンクリートキャスクのキャニスタ表面 付着塩分量評価」、電中研報告N09023(2010).
- 8) 竹田、三枝「キャニスタSCC防止に対する塩分流入低 減装置の開発(その2)」、電中研報告N11044 (2012).

電力中央研究所 三枝利有·白井孝治 (2013年2月15日)