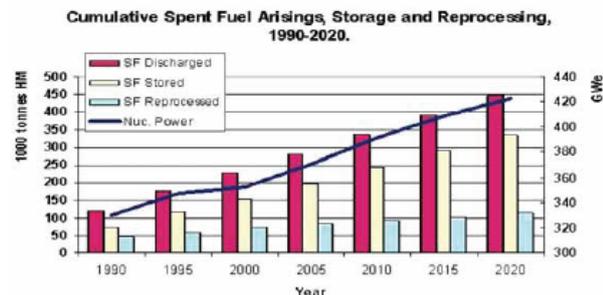


5-2 貯蔵の方法

1. はじめに

原子炉から取り出された使用済燃料は、一旦、原子炉建屋内の燃料プールで貯蔵される。一定期間、燃料プールで貯蔵された燃料は、発熱量や放射線強度が低下するため、輸送容器（あるいは輸送貯蔵兼用容器）に入れて、燃料プールから取り出し、貯蔵施設や再処理工場へ輸送することが可能となる。使用済燃料を再処理してプルトニウムを利用する場合、使用済燃料はリサイクル可能な資源の位置づけとなる。従って、使用済燃料は、エネルギー資源の一つとして考えることもできる。2005年10月の原子力政策大綱¹⁾では、“使用済燃料の中間貯蔵は、使用済燃料が再処理されるまでの間の時間的な調整を行うことを可能にするので、核燃料サイクル全体の運営に柔軟性を付与する手段として重要であり、現在、事業者が操業に向け施設の立地を進めている”と記載がある。さらに、“使用済燃料は、当面は、利用可能になる再処理能力の範囲で再処理を行うこととし、これを超えて発生するものは中間貯蔵することとする”とある。現在（2013年2月）、原子力大綱の見直しが議論され、原子燃料サイクルについても、三つのオプションが示されているが、いずれのオプションでも、中間貯蔵は原子燃料サイクルに柔軟性を付与することから、重要な役割を担うこととなる。貯蔵が重要な役割を担っていることは、原子力発電を行っている他の国々も、同様である。第1図に、世界の貯蔵量の推移を示す²⁾。2010年時点での世界の使用済燃料累積量は、約334,500tHMで、そのうちの約2/3が貯蔵されている。今後、累積発生量が増え続けると、貯蔵量も増加することが見込まれる。



第1図 使用済燃料の累積発生量、貯蔵量、再処理量

わが国では、2013年2月時点で、青森県六ヶ所村にある日本原燃再処理工場の操業開始が遅れていることから、再処理工場の貯蔵用燃料プールが満杯に近い状態となっている。従って、各原子力発電所の燃料プールから、使用済燃料が再処理工場の燃料プールに搬出できない状態である。各発電所の燃料プールが一杯になると原子炉の運転を停止しなければならないため、その前に貯蔵

容量を増加させる必要がある。貯蔵容量を増加させる方法の一つとして、燃料プールの容量を増やす方法がある。容量を増やす方法として、燃料プール全体のサイズを大きくするのではなく、燃料を保管している燃料ラックの格子間隔を狭め、同じ広さの中により多くの燃料を貯蔵する方法がある。間隔を狭めるために、ラック材にボロンを添加して未臨界性を高めている。この方法は“リラッキング”と呼ばれる技術で、すでにいくつかの発電所で、実施されている。また、既設の燃料プールに変更工事を行わずに済む貯蔵対策として、同じ敷地内に複数の原子炉がある場合、ある号機の燃料プールから別の号機の燃料プールに移送する方法もある。原子炉建屋貯蔵容量を増すもう一つの方法は、新たに貯蔵施設を建設する方法である。貯蔵方式には、大きく分けて二つの方式がある。一つは、水中で貯蔵する方式で湿式貯蔵と呼び、もう一つはヘリウム雰囲気中などに貯蔵する方式で乾式貯蔵と呼ぶ。貯蔵施設を建設する場所を発電所敷地内とするか、敷地外とするかも、選択肢である。わが国ではこれまで、敷地内貯蔵施設しかなかったが、東京電力(株)および日本原子力発電(株)が共同出資して設立したリサイクル燃料貯蔵(株)は、わが国で初めて敷地外の貯蔵施設を青森県むつ市に建設中である。世界的に見ても、敷地内貯蔵が多いが、今後は敷地外の集中貯蔵が増す可能性がある。以下に各貯蔵方式の特徴を記載する。

2. プール貯蔵方式

使用済燃料をラックに入れ、水プール内に貯蔵する方式で、水により遮蔽と除熱を行う。使用済燃料の環境雰囲気は水である。除熱性能に優れるので、炉から取出し直後の発熱量の高い使用済燃料貯蔵に適する。一方、除熱を強制冷却で行うためのコストや冷却水の管理と廃棄物により運転コストが発生する。この方式は、大容量貯蔵に適する。

第2図に、東京電力福島第一原子力発電所共用プールの写真を示す³⁾。これは、1997年10月に完成した敷地内貯蔵施設で、貯蔵容量は6840体である。

3. 金属キャスク貯蔵方式

使用済燃料をキャスクと呼ばれる金属製の円筒容器に入れ、貯蔵する方式である。発電所の燃料プールで、使用済燃料を金属キャスク内に挿入し、貯蔵施設に輸送してそのまま貯蔵する。金属キャスクは、収納する使用済燃料の体数・仕様によりサイズが異なるが、大きいものでは直径約2.5m、高さ約5m、重量約110トンになる。第3図に、輸送貯蔵兼用キャスクの概要図を示す。貯蔵

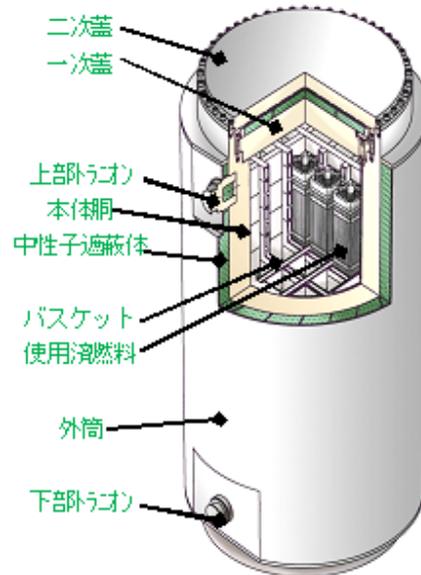


第2図 使用済燃料共用プール(福島第一原子力発電所)³⁾

キャスクは輸送キャスクと同様の構造であり、衝撃や火災に耐える堅固な性能を有しており、それ自体で臨界防止・密封・除熱・遮蔽の機能を有する。燃料を貯蔵期間中に酸化雰囲気としないため、キャスク内雰囲気は通常ヘリウムガスとして、二重蓋構造を採用し圧力障壁を形成しているところが輸送(専用)キャスクと異なる。また、貯蔵期間中の長期間の密封性能を確保するため、蓋のOリングに金属ガスケットを用いていることも輸送キャスクとは異なる。輸送キャスクではゴムガスケットが用いられている。金属ガスケットは、長期間高い密封性能を維持できることが特徴である。遮蔽機能は、鋼製の本体胴とレジン等の中性子遮蔽体により確保している。臨界防止機能として、キャスク内のバスケットにより個々の使用済燃料を隔離するとともに、バスケット材の中にボロン等の中性子吸収材を入れている。使用済燃料のキャスク1基当たり10tU程度の使用済燃料を貯蔵する。必要に応じて簡単に増設できるモジュール性が特徴で、投資のリスクが小さい。米国では、金属キャスクを屋外にそのまま並べて貯蔵されているが、わが国やその他の国々では屋内で貯蔵されているケースが多い。いずれのケースでも、除熱は自然空冷である。

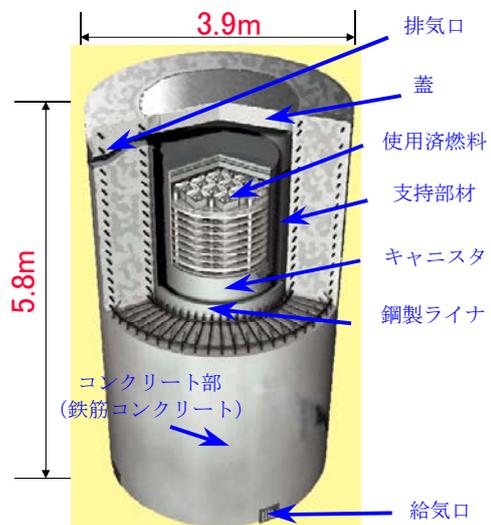
4. コンクリートキャスク貯蔵方式

使用済燃料をキャニスタと呼ばれる薄肉円筒容器に入れ、そのキャニスタを貯蔵容器に垂直姿勢で入れて貯蔵する方式である。第4図に、コンクリートキャスク貯蔵の設計概念例を示す。キャニスタは直径約1.7m、高さ約4.6mで、貯蔵容器は直径約4m、高さ約6mである。使用済燃料、キャニスタおよび貯蔵容器を含めた重量は約180トンである。この方式では、発電所の燃料プールで使用済燃料をキャニスタ内に挿入した後、蓋を溶接して密封性を確保する。キャニスタ内雰囲気は金属キャスクと同様に、通常、ヘリウムガスである。キャニスタは一旦輸送キャスクに入れられて、貯蔵施設まで運ばれ、貯蔵容器内に入れ換えられる。貯蔵容器には、通常、給気口と排気口



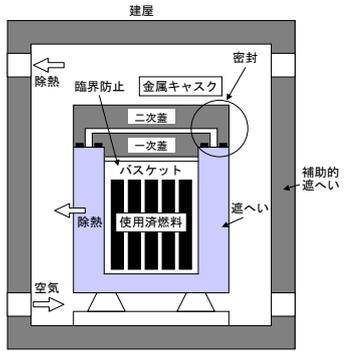
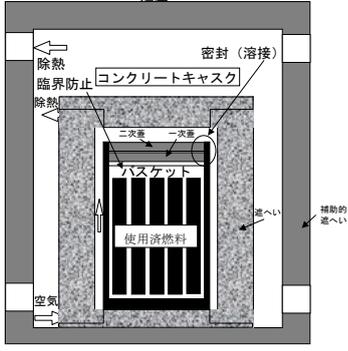
第3図 輸送貯蔵兼用キャスクの設計概念例

があり、給気口から流入した空気がキャニスタ表面に沿って流れ、キャニスタ内の熱を除去して排気口から外に出ていく。コンクリートキャスクも、除熱は自然空冷である。遮蔽機能はキャニスタおよびコンクリート(貯蔵容器内面のライナーも含む)で確保する。コンクリートキャスク貯蔵は、金属キャスク貯蔵に比べ経済的な優位性があるとされており⁴⁾、特に米国では、コンクリートキャスク貯蔵方式が主流となっている。わが国では、キャニスタの密封健全性に関わる溶接部の応力腐食割れ(SCC)の発生等、いくつかの課題が残されていることから実用化には至っていないが、実用化に向けた研究開発が行われている。キャニスタのSCCについては、米国でも評価が必要であるとの認識が持たれ、研究が進められている。



第4図 コンクリートキャスクの設計概念例

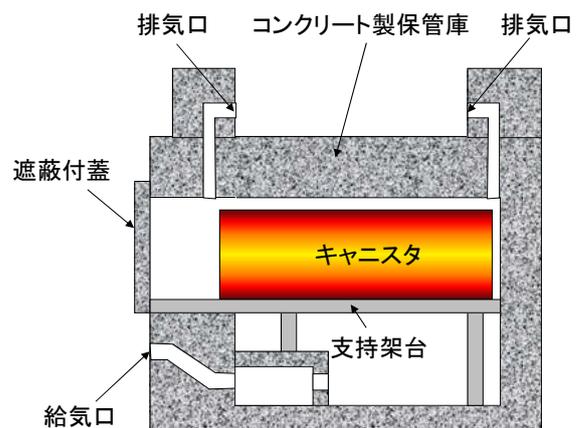
第1表 日本における金属キャスクとコンクリートキャスク貯蔵方式の設計概念比較

方式	金属キャスク貯蔵	コンクリートキャスク貯蔵
キャスクおよび貯蔵施設の概念例		
キャスク総重量	110 トン (PWR24 体または BWR69 体収納時)	180 トン (PWR24 体または BWR69 体収納時)
キャスクの主な機能	輸送・貯蔵兼用	貯蔵専用
密封機能	一次蓋、二次蓋とも金属ガスケット (蓋間圧力常時監視。外部への漏えいを実質無視できるよう金属キャスク内部は負圧、蓋間空間は正圧。)	一次蓋、二次蓋とも溶接構造 (蓋間圧力監視なし。除熱性能の向上を期待する場合、キャニスタ内部は正圧。)
キャスクの遮へい機能	鋼、鉛、レジン、グリコール水の組合せ	コンクリート、鋼の組合せ (蓋にレジンを使用する場合あり。)
未臨界機能	キャスクバスケットの幾何学的配置及び中性子吸収材により未臨界を維持	
除熱機能	金属キャスク表面を自然冷却	コンクリート製貯蔵容器に給排気口があり、キャニスタ表面を自然冷却

第1表に、わが国における金属キャスクとコンクリートキャスク貯蔵方式の設計概念の比較⁵⁾を示す。

5. 横型サイロ貯蔵方式

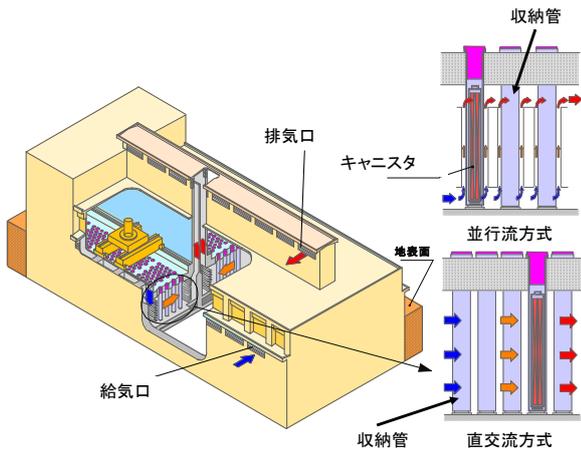
コンクリートキャスクを横型にした方式で、使用済燃料をキャニスタに詰め、保管庫に水平姿勢で貯蔵する方式である。第5図に、横型サイロ貯蔵の設計概念例を示す。キャニスタの構造は、コンクリートキャスクの場合とほぼ同様である。キャニスタを輸送(移送)キャスクから保管庫に水平姿勢で挿入する際、輸送キャスクを高く吊り上げる必要がないという特徴がある。その他の特徴や安全機能の考え方は、コンクリートキャスクと同様である。



第5図 横型サイロの設計概念例

6. ボールト貯蔵方式

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。除熱は、空気による自然空冷である。冷却空気の流れによって二つのタイプがある。収納管を二重にして、そのすき間を冷却空気が収納管に沿って流れる方式と収納管を横切って流れる方式である。使用済燃料の環境雰囲気はヘリウムガスである。第6図に、ボールト貯蔵の設計概念例を示す。この方式の特徴は、使用済燃料の大容量貯蔵に適することである。



第6図 ボールト貯蔵方式の設計概念例

7. 貯蔵方式の技術開発の歴史

第2表に、これらの貯蔵方式の技術開発の歴史を示す²⁾。貯蔵は、敷地内外の燃料プールで始まり、その後、現在の乾式貯蔵の主流である金属キャスク、コンクリートキャスクでの貯蔵が開始されるようになった。

輸送貯蔵兼用の金属キャスク貯蔵では、数十年の貯蔵後の輸送規則適合性が課題となる可能性がある。輸送規則に大幅な変更が無ければ、問題は少ない。一方、コンクリートキャスク貯蔵などキャニスタに貯蔵した使用済燃料を、将来、別の輸送キャスクに入れて輸送する方式では、この輸送規則適合性の課題は無い。

第2表 使用済燃料貯蔵方式の技術開発の歴史

種別	年				
	1950-1960	1970	1980	1990	2000 ～
湿式	多くの敷地内外プール				
乾式	ボールト貯蔵方式(1971 ウィルファ)				
	縦型サイロ(1977 ホイトシェル)				
	金属キャスク(1986 サリー)				
	金属キャスク(コアレーベン)				
	コンクリートキャスク(1992 サリー)				

(表中、縦型サイロは、コンクリートキャスクの一種)

参考文献

- 1) 原子力委員会、原子力政策大綱(2005)
- 2) IAEA: “Costing of Spent Nuclear Fuel Storage”, No. NF-T-3.5 (2009)
- 3) Kumano, Y. (TEPCO): “Integrity Inspection of Dry Storage Casks and Spent Fuels at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, Proc. ISSF 2010, Komae(Tokyo).
- 4) Lambert, R.W., Zabransky, D.K. and Massey, J.V.: “Evaluation of Comparative System Economics and Operability of Concrete Casks for Fuel Storage”, Proc. Waste Management, 1992
- 5) コンクリートキャスク貯蔵技術, 電中研レビュー, No. 52 (2006)

電力中央研究所 亘 真澄
(2013年2月15日)