

第 1 章

1

なぜコンクリートキャ  
スクか（中間貯蔵技術  
としてのメリット）

## 第1章 なぜコンクリートキャスクか（中間貯蔵技術としてのメリット） 目次

社会経済研究所 上席研究員 長野 浩司  
地球工学研究所 バックエンド研究センター 上席研究員 白井 孝治  
地球工学研究所 重点課題責任者 研究参事 三枝 利有

1 - 1 不確実性を考慮した使用済燃料貯蔵需要 .....	9
1 - 2 海外におけるコンクリートキャスク貯蔵 .....	11
1 - 3 金属キャスク貯蔵とコンクリートキャスク貯蔵の比較 .....	15



長野 浩司（1987年入所）  
使用済燃料貯蔵技術の経済性比較、原燃サイクルと炉型戦略のモデル分析、長期世界エネルギーモデル分析等を基盤として、原子力とくに原燃サイクル政策の研究に取り組んでいる。

（1-1執筆）



白井 孝治（1987年入所）  
放射性物質輸送容器の落下衝撃に対する健全性評価、天然UF6輸送容器耐火・破裂評価、航空機等の飛来物に対する鉄筋コンクリートの耐衝撃性評価研究等に従事。一方、使用済燃料貯蔵技術については、金属キャスクの落下衝撃や耐震性評価に従事し、ここ数年間、コンクリートキャスク貯蔵方式の実用化研究に取り組んでいる。

（1-2執筆）



三枝 利有（1983年入所）  
専門は材料科学・工学。入所以来、使用済燃料等の輸送・貯蔵研究に従事。これまで、金属キャスク貯蔵及びコンクリートキャスク貯蔵方式の実用化研究を実施・とりまとめた。今後は大容量・長期貯蔵に向けた研究などを旨とする。

（1-3執筆）

# 1-1 不確実性を考慮した使用済燃料貯蔵需要

## (1) 使用済燃料貯蔵の意義と課題

当所はかねてより、原燃サイクル戦略における使用済燃料貯蔵の基本的意義について、以下の3つの側面を指摘してきた<sup>(1)(2)</sup>。

- ・原子炉付設プールの容量超過を回避する「緊急避難措置」
- ・再処理施設への使用済燃料フィードの調整機能
- ・将来の不確実性への対処

原子力委員会は、2004年6月に設置した「新計画策定会議」での議論を基に、2005年10月に「原子力政策大綱」<sup>(3)</sup>を策定し、閣議決定した。大綱における使用済燃料貯蔵に関する記載を抜き出してみる。まず、「1-2. 現状認識」においては、「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」<sup>(3)</sup>との認識を示している。今回の大綱策定における最初かつ最重要のステップであった、将来の核燃料サイクルのあり方に関する4つのシナリオの比較評価において、「我が国においては、核燃料資源を合理的に達成できる限りにおいて有効に利用することを目指して、(一部略)使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム、ウラン等を有効利用することを基本的方針とする」<sup>(3)</sup>と結論づけた上で、「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。中間貯蔵された使用済燃料及びプルサーマルに伴って発生する軽水炉使用済 MOX 燃料の処理の方策は、六ヶ所再処理工場の運転実績、高速増殖炉及び再処理技術に関する研究開発の進捗状況、核不拡散を巡る国際的な動向等を踏まえて2010年頃から検討を開始する。」<sup>(3)</sup>とした。

大綱は、使用済燃料貯蔵に関する上述の3つの側面のうち、最も重要と考えられる第3の「不確実性への対処」を今後の核燃料サイクルの展開において積極的に活用しようとする一方で、長期的な方向性、とりわけ今後発生していく MOX 燃料などの対処については適切な検討を要する課題と捉えている。

本節では、将来の貯蔵需要の動向を概観した上で、使用済燃料貯蔵技術に求められる役割、とりわけコンクリートキャスク貯蔵に代表されるコンクリートモジュール貯蔵技術の特色を活用する方途について展望を示す。

## (2) 不確実性を考慮した使用済燃料貯蔵需要評価<sup>(4)(5)</sup>

2050年にかけて発生する使用済燃料貯蔵需要、とりわけその不確実性への対処について、本項では次の2ケースを対象に考察する。

最尤度(基本)ケース：基本的に従来想定のとおりであり、現時点において最も蓋然性が高いと考えられるケース

リスク管理ケース：極端かつ蓋然性は低いながら、このケースへの対処を念頭におくことで他の状況へも十分余裕をもったロバストな対処が可能となるケース

具体的なリスク管理ケースとして、ここではPA上その他の理由によりプルサーマルの実施が遅延を迫られ、プルトニウム需要が低減することへの対処として再処理施設の操業スケジュールの調整を図る状況を想定し、以下の2オプションを設定した。

リスク管理Aケース：再処理施設の設備利用率を50%として操業を続け、プルサーマル実施が軌道に乗った時点で設備利用率を100%として操業する。

リスク管理Bケース：計算期間を通じて再処理施設の設備利用率50%で操業する。

評価の結果として、図1-1-1は、日本全国の使用済燃料管理の時間推移を、最尤度ケースを例に示している。最尤度ケースにおいては現行計画の通りプルサーマルを実施するため、相当量のMOX使用済燃料が発生していく。図1-1-1は全国集計値を示しているが、発電所サイト毎にみれば、原子炉付設プールの貯蔵容量に余裕のあるサイトと、追加の貯蔵措置の機動的発動が求められるサイトが混在していることが示唆される。次に、日本全国大での使用済燃料貯蔵需要の推移を図1-1-2に示す。最尤度ケースにおいては、2050年までに10,000tHM程度の貯蔵需要が発生していくが、リスク管理ケースにおいては対処必要量が增大するとともに、貯蔵需要の発生

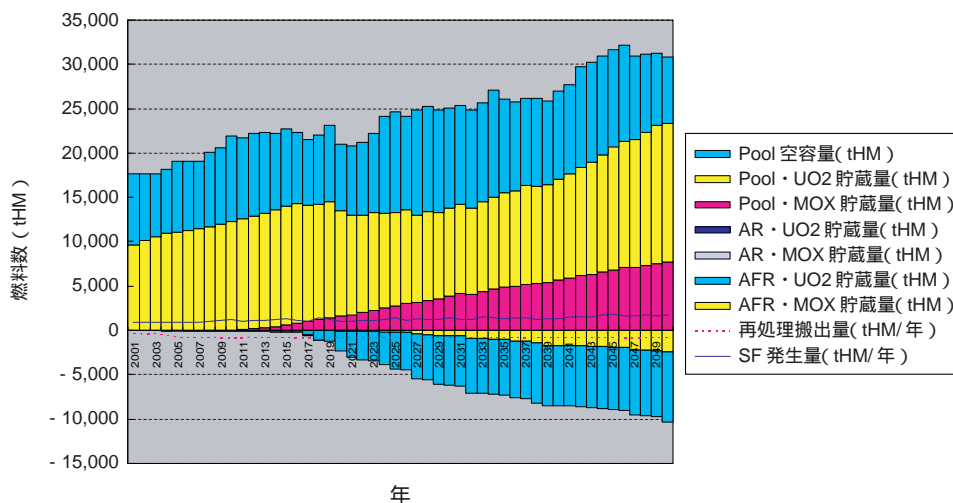


図1-1-1 最尤度ケースの使用済燃料管理動態<sup>(4)</sup>

横軸より上部が各発電所サイトでの蓄積・管理状況、下部が敷地外 (AFR) 貯蔵施設での貯蔵状況を示す

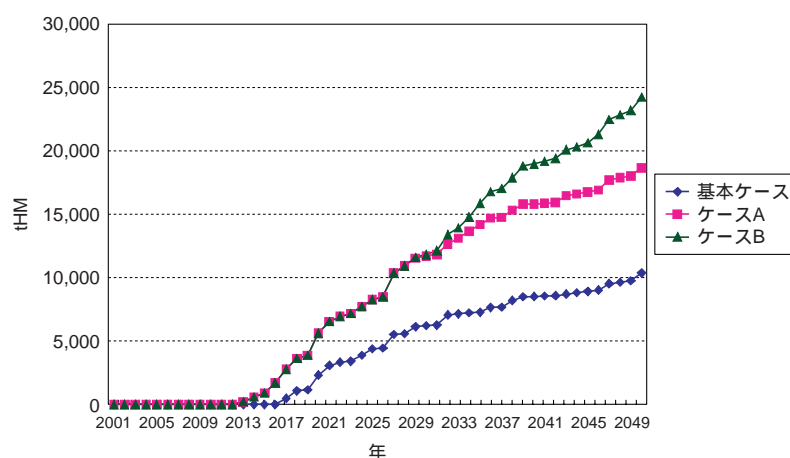


図1-1-2 日本全国大の敷地外貯蔵需要<sup>(4)</sup>

年も4年程度早期化している。

### (3) 考察：コンクリートモジュール貯蔵の意義

以上の評価を通じて、将来の使用済燃料貯蔵需要への対応においては、多様な貯蔵ニーズに適用可能であり、かつ機動的な展開と配備を可能とする貯蔵技術が要求さ

れているといえる。これらの点において、コンクリートキャスク貯蔵に代表されるコンクリートモジュール貯蔵方式は、他の貯蔵方式と比較して、そのモジュール性や簡素かつ良好な施工性、設備更新や解体撤去の容易さなどにより、状況変化への機動的な対処を可能とする有利な特徴を具備していると考えられる。

## 1-2 海外におけるコンクリートキャスク貯蔵

### 1-2-1 概要

使用済燃料の中間貯蔵はわが国のみならず、海外においても重要課題であり、様々な技術開発が行われており、参考になるところが多い。1980年代以降、ドイツで最初の乾式貯蔵技術を用いた中間貯蔵施設が実用化し、その後、スイスでも、既実績のある乾式貯蔵技術に加え、国内の発電所の事情等から、乾式の詰め替え設備を有する中間貯蔵施設が実用化している。また、スウェーデンでは地下式の湿式貯蔵施設が実用化している。米国では金属キャスクのみならずコンクリートキャスクについても許認可や施設運転の実績があり、現在民間による敷地外コンクリートキャスク貯蔵施設の建設計画が推進されている。

本章では、米国における貯蔵対策の動向とコンクリートキャスク貯蔵方式による中間貯蔵の実績と計画について述べる。

### 1-2-2 米国の規制体系

米国安全規制委員会（NRC）における独立使用済燃料貯蔵施設（ISFSI：Independent Spent Fuel Storage Installation）の審査過程では、SFPO（Spent Fuel Project Office）が、中核的な役割を果たしている。

使用済燃料貯蔵に関しての認可に必要な手続きおよび条件、技術要件、管理要件等は、連邦規則10CFR（Code of Federal Regulations）Part72「使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の独立貯蔵に関する認可要件（Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste）」に規定されている。

乾式貯蔵施設の審査に関しては、以下の審査指針に基づいている。

- ・ NUREG-1536「乾式キャスク貯蔵システムの標準審査指針（Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems, NUREG-1536）」
- ・ NUREG-1567「乾式キャスク貯蔵施設の標準審査指針

（Standard Review Plan for Dry Cask Storage Facilities, NUREG-1567）」

これらの審査指針は、審査を行う際の透明性・公平性を期すために定めたものである。また、緊急事項に対しては、Interim Staff Guidance（ISG）という暫定的な審査指針を作成し、円滑な審査の一助としている。

米国での貯蔵施設あるいはキャスクの認可には以下に示す2つの手順がある。

#### サイト固有認可（Site Specific License）

10CFR72に沿って認可手続きをするものであり、NUREG-1567に基づく。NRCが申請を受理した後、基本的には公開となり一般公衆が検閲でき、また公聴会の開催を要求できる。認可は最大20年までとしているが延長も可能である。

サイト固有認可の例として、アイダホ国立研究所（Idaho Nuclear Engineering and Environmental Laboratory, INEEL/DOE）や民間燃料貯蔵施設（Private Fuel Storage Facility, PFSF）がある。

#### 一般認可（General License）

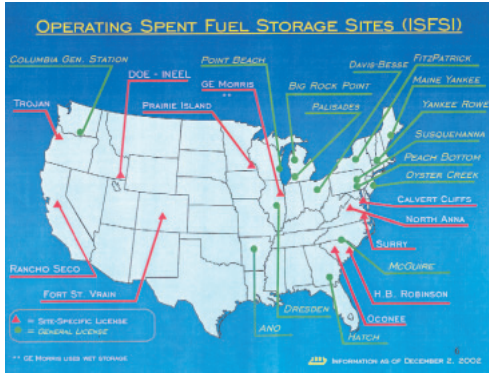
申請者の許認可手続きを軽減するため、10CFR Part72の1990年に改正において取り入れられた認可の方法であり、NUREG-1536に基づく。申請者は、10CFR Part72サブパートK（発電用原子炉の設置場所での使用済燃料の貯蔵にかかる一般認可）に従って、すでに10CFR Part50に従い原子炉としての認可を受けているサイト内でその炉から取り出された燃料を貯蔵する場合には、申請書の提出なしに事前届だけで認可される。

#### 各許認可手順の利点・欠点

一般認可は10CFR Part50に基づいて運転が認可されている原子炉に限定される。したがって、廃炉を計画している原子炉では、廃炉後の使用済燃料はサイト固有認可に基づく。

一般認可では貯蔵される使用済燃料は健全でなければならないので、破損燃料は、サイト固有認可の場合のみ貯蔵できる。

一般認可では新たな安全解析書（SAR）や安全評価書（SER）を必要とせず、パブリックコメントの期



(運転中)



(認可準備中)

図1-2-1 米国におけるISFSIの立地状況 (2002年12月2日現在)

間を設けてないので時間と費用を節約できる。一方、サイト固有認可では、詳細な環境影響評価等に伴う多大な時間と費用が発生するが、公衆の意見を反映した

認可の変更が可能である。

### 1-2-3 使用済燃料貯蔵の状況

使用済燃料の貯蔵状況<sup>(1)</sup>は、1997年時点では商業炉サイト内で36,600トン、2005年には52,000トンまで増加すると予測されている。2002年5月現在で、42,540トン(燃料集合体：約117,000体相当)の使用済燃料が貯蔵され、そのうち約10%が乾式貯蔵方式である。

図1-2-1に、米国におけるISFSIの立地状況を示す。2002年12月2日現在で、ISFSIは全米26サイト(サイト固有認可11サイト、一般認可15サイト)で運転されている。また、13サイト(サイト固有認可5サイト、一般認可8サイト)で、認可を準備中である。

1986年6月に乾式貯蔵を開始して以来、26サイトにおいて使用済燃料の貯蔵が行われているが、作業員、公衆および環境に影響を及ぼす放射線の漏れもなく安全に貯蔵が行われている。

### 1-2-4 コンクリートキャスク貯蔵方式による中間貯蔵の実績と計画

#### (1) 貯蔵実績

表1-2-1に、米国におけるコンクリートキャスク方式

表1-2-1 米国におけるコンクリートキャスク方式による貯蔵の実績と計画 (2004年開始予定分～)

原子力発電所 (施設)	原子力発電所 (施設)	BNFL Fuel Solutions		Holtec	NAC
		VSC-24	I Solutions ( TranStor/Wesflex )	HI-STORM100	NAC UMS
発電所敷地内貯蔵施設					
パリセード	1993	18			
ポイントビーチ	1995	12			
アーカンソーニュークリアワン (ANO)	1996	17			
ハッチ	2000			4	
ドレスデン	2000			10	
フィッツバトリック	(2002)				
ビクロックポイント	(2002)				
ヤンキーロー	(2002)				
メインヤンキー	(2002)				
トロージャン	(2002)		(*)	(*)	
コネチカットヤンキー	(2002)				
パロベルデ	(2002)				
バーモントヤンキー	(2002)				
WNP2	(2002)				
マクガイヤー	(2003)				
セコヤー	(2004)				
発電所敷地外貯蔵施設					
PFSF (ユタ州・スカルバレー)	(2004)				

貯蔵実績 (数字はキャスク基数) 貯蔵計画 (\*)貯蔵キャスクはBNFL Fuel Solutions製、キャニスタはHoltec社製

による貯蔵の実績と計画を示す。図1-2-2および図1-2-3に、コンクリートキャスクの貯蔵状況および発電所内のキャニスタの装荷作業を示す。また、図1-2-4に、キャニスタの詰替装置やコンクリートキャスク移送装置の例を示す。



図1-2-2 コンクリートキャスクの貯蔵状況（米国）

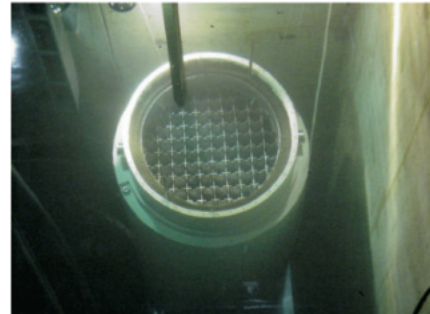


図1-2-4 キャニスタの詰替装置やコンクリートキャスク移送装置の例

## (2) 敷地外使用済燃料貯蔵施設の動向

米国における最初の敷地外乾式使用済燃料貯蔵施設として、PFSFと呼ばれる独立使用済燃料貯蔵施設の開発、認可、建設が民間企業において取り組まれており、2001年12月にNRCから最終の修正安全評価書（SER）を得ている。

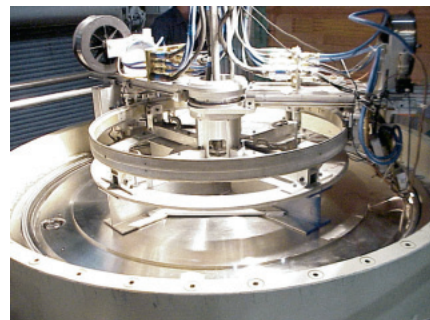
表1-2-2に、PFSFの概要を示す。また、図1-2-5に、



（プール内での燃料装荷作業）



（プール内からのキャスク吊上げ）



（キャニスタ蓋部の溶接）



（キャニスタ輸送キャスクの目視検査）

図1-2-3 発電所内のキャニスタの装荷作業

表1-2-2 PFSFの概要

貯蔵施設概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 予 定 地：ユタ州スカルバレーのインディアン居留地内（ソルトレーク市南西約 110km）</li> <li>・ 立地条件：内陸部の半乾燥大陸気候</li> <li>・ 敷地面積：約 3.3km<sup>2</sup>（約 1.8km × 約 1.8km）</li> <li>・ 貯蔵容量：40,000ton（コンクリートキャスク約 4,000 基）</li> <li>・ 貯蔵方式：コンクリートキャスク（HI-STORM 100 を採用予定）</li> <li>・ 申 請 者：PFSF/LLC（Limited Liability Company、8 電力のコンソーシアム）</li> <li>・ 認可状況 1997 年 6 月：申請 2001 年 12 月：NRC による最終修正安全評価書（SER）の発行 2002 年 1 月：NRC による最終環境影響評価書（EIS）の発行</li> </ul>
コンクリートキャスク	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Holtec 社製 HI-STORM 100</li> <li>・ 鋼板コンクリート製：外寸：3.37m × 5.87mH（胴部遮へい厚 68cm）</li> <li>・ キャニスタ（ステンレス鋼製）：外寸：1.74m × 4.84mH（胴部肉厚 12.7mm）</li> <li>・ 認可状況 2000 年 5 月貯蔵認可取得</li> </ul>

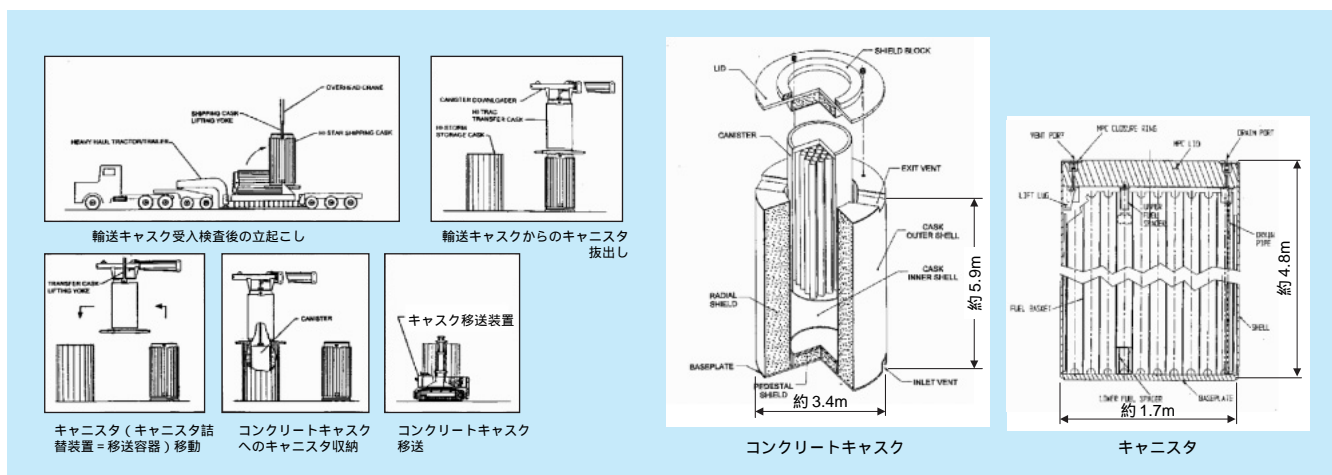


図1-2-5 PFSF施設内での取扱方法やコンクリートキャスクの構造概要

施設内での取扱方法やコンクリートキャスクの構造概要を示す。

### 1-2-5 認可済・審査中の各技術の状況

現在、表 1-2-3 に示すように、NRC が認可した使用済燃料貯蔵キャスクは 14 種類あり、このうちコンクリートキャスクは、NAC-UMS、FuelSolutionsTM、VSC-24、HI-STORM 100 の 4 種類である。標準的な認可期間は 20 年間であり、その後さらに 20 年延長することも可能である。

表1-2-3 NRCが認可した使用済燃料貯蔵キャスク

製造業者	キャスクモデル	認定有効期限
General Nuclear Systems	CASTOR V/21	2010 年 8 月
Nuclear Assurance Corp.	NAC S/T	2010 年 8 月
	NAC C28 S/T	2010 年 8 月
	NAC-UMS	2020 年 6 月
	TN-32 MPC	2020 年 4 月
Transnuclear West	NUHOMS-24P	2015 年 1 月
	NUHOMS-52B	
Transnuclear, Inc.	TN-24	2015 年 1 月
	TN-68	2013 年 11 月
British Nuclear Fuel System Solutions	Fuel Solutions™	2021 年 2 月
Pacific Sierra Nuclear Associates	VSC-24	2013 年 5 月
Holtec International	HI-STAR 100*	2019 年 10 月
Holtec International	HI-STORM 100	2020 年 6 月

\* 2000 年に、初の貯蔵と輸送両用システム（MPC68 キャニスタを使用）の認可取得。



# 1 - 3 金属キャスク貯蔵とコンクリートキャスク貯蔵の比較

## (1) 技術的比較

表1-3-1は、日本における金属キャスクとコンクリートキャスクの設計概念を技術的に比較した結果を示す<sup>(1)</sup>。設計には他の多様な概念も有り得る。例えば、輸送可能なコンクリートキャスクの設計も有り得る。実際、輸送・貯蔵兼用のコンクリートキャスク・金属製キャスク

がドイツで報告されている<sup>(2)</sup>。

## (2) 経済性比較

表1-3-2は、文献<sup>(3)</sup>におけるキャスク（固定費）の経済性比較の例である。この種の公開文献は、きわめて限られており、実際のコストはそのときの条件により異

表1-3-1 日本における金属キャスクとコンクリートキャスク両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に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

表1-3-2 キャスクの容量と経済性比較

キャスクの種類	容 量	キャスク単価\$10 <sup>3</sup>
コンクリートキャスク（貯蔵専用）	24/52 PWR/BWR	\$350
コンクリートキャスク輸送可能バスケット	24/52 PWR/BWR	\$400
横型コンクリートサイロ（貯蔵専用）	24/52 PWR/BWR	\$500
輸送・貯蔵兼用金属キャスク	26 PWR	\$1,000 ~ \$1,500
船積み可能な貯蔵用金属キャスク	21 PWR	\$1,500 ~ \$3,500
貯蔵専用金属キャスク	24/52 PWR/BWR	\$750 ~ \$1,500
輸送専用金属キャスク	21 PWR	\$1,500 ~ \$3,500

なる。同文献には、運転費として、原子力発電所やMRS貯蔵等でのハンドリングコストも記載している。固定費と運転費を合計した全システム費用で比べると、コンクリートキャスク貯蔵は金属キャスク貯蔵に比べて10～20%低コストとされている。