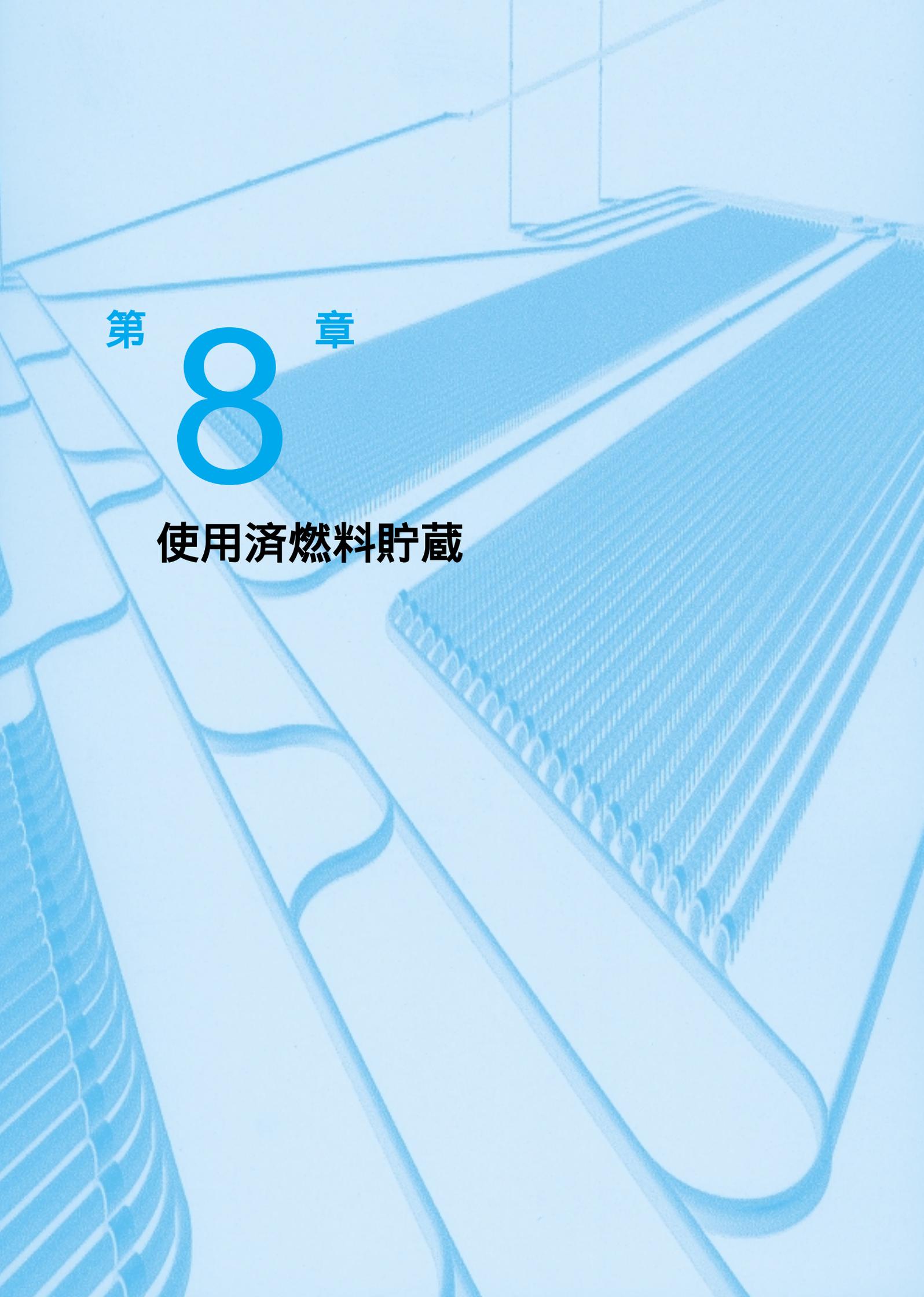


第 8 章

8

使用済燃料貯蔵



経済社会研究所構造部 主任研究員	長野 浩司	狛江研究所原子力システム部 部長	松村 哲夫
狛江研究所原子力システム部 主任研究員	笹原 昭博	我孫子研究所構造部 上席研究員	伊藤 千浩
我孫子研究所構造部 主任研究員	加藤 治	我孫子研究所水理部 上席研究員	古賀 智成
我孫子研究所水理部 主任研究員	竹田 浩文	我孫子研究所構造部 主任研究員	白井 孝治
我孫子研究所水理部 主任研究員	亘 真澄	我孫子研究所構造部 上席研究員	小崎 明郎
		我孫子研究所リサイクル燃料貯蔵技術課題推進担当	三枝 利有
8 - 1	貯蔵の需要	83	
8 - 2	貯蔵の経済性	84	
8 - 3	金属キャスク貯蔵技術確証試験 - 通常時健全性 -	87	
8 - 4	金属キャスク貯蔵技術確証試験 - 異常時健全性 -	89	
8 - 5	高燃焼度・MOX使用済燃料貯蔵技術	90	



長野 浩司（1987年入所）
 経済社会研究所主任研究員。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などに従事。原子力を中心とするエネルギーモデル分析を基盤として、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。

松村 哲夫（58ページに掲載）

伊藤 千浩（8ページに掲載）



笹原 昭博（1987年入所）
 これまでFBR関係では超ウラン元素の消滅解析、リサイクル時の質量バランス解析、炉心安全性パラメータ解析および超ウラン元素金属の製造を行ってきた。軽水炉関係では炉心燃焼解析、核種生成量解析評価、貯蔵時の燃料特性評価を行ってきた。今後は、照射燃料で得た実験データをより詳細に検討してゆきたい。



古賀 智成（1988年入所）
 長年、新型炉の開発、特にプラントの安全設計、システム設計、流動評価などに従事しており、'98年から2年間は当所のFBR実証炉技術課題推進を担当した。使用済燃料貯蔵技術関連では、'90年から'97年まで受託；乾式貯蔵技術実用化試験に検討委員会委員や担当者として参画し、'98、'99年にはキャスク貯蔵施設除熱性能試験(東電依頼)を担当した。

白井 孝治（72ページに掲載）



竹田 浩文（1988年入所）
 FBR炉内および使用済燃料中間貯蔵施設内を対象とした熱流動現象に関する研究に従事。特に、自然循環現象における諸現象の解明および模型試験によって実機現象を精度良く予測するための相似則について検討している。



小崎 明郎（1991年入所）
 金属材料構造物の腐食寿命評価（特にすきま腐食）や破壊力学的健全性評価に関する研究に携わってきた。現在、輸送容器の海没時の腐食評価、貯蔵容器の潮風腐食健全性評価、高レベル放射性廃棄物の地層処分オーバーバック材の長期腐食寿命評価等に取り組んでいる。

亘 真澄（72ページに掲載）

三枝 利有（8ページに掲載）

8 - 1 貯蔵の需要

当所はかねてより、原子燃料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^{(1)、(16)}。

- ・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(搬入)の調整機能
- ・将来の不確実性への対処

わが国の原子力発電部門においては、まず第2の必要性が1987年の「原子力長計」において指摘され、相前後して第1の必要性が差し迫ったものとなり、その結果、各発電所におけるプール容量増強、日本原子力発電敦賀発電所における使用済燃料の号機間移送、東京電力福島第一発電所における共用プール及びキャスク貯蔵施設の設置等、個別の対策が相次いで導入されてきた。さらに、第3の意義及びエネルギー資源利用上の意義に関連して、1998年6月の総合エネルギー調査会原子力部会の中間報告書⁽²⁾において「リサイクル燃料資源貯蔵」の早期実用化への意志が強く示され、これを受けて1999年の原子炉等規制法の改正により「貯蔵の業」が新たに規定されるなど、着実な制度整備が行われている。

本節では、将来の貯蔵需要の動向を概観する。2020年程度までの貯蔵需要については、資源エネルギー庁による予測評価が行われている。その概要⁽³⁾を表8-1-1に示す。わが国の原子力発電設備容量が着実な伸びを続けることにより、年間の使用済燃料発生量は徐々に増加し、所要となる貯蔵対策の規模もまた着実に増大すると予測

されている。それ以降については、原子力発電設備容量のみならず、2010年を目途に方針が決定される第二民間再処理工場などの動向など、多くの不確実性要因があるため、厳密な予測は困難である。表8-1-2は、一連の仮定条件を置いた上での試算として、あくまでも参考のために示したものである。このうちのどれが実現し、また望ましいかの議論はここでは差し控えるが、貯蔵に求められる役割として重要な視点が3つある。

第一に、2020-30年程度の中期的には、表8-1-1の予測及びその外挿線上で予測可能な規模の貯蔵が必要なことが確実であり、適切な時期に所要の貯蔵能力を確保できるよう、着実な施策の展開が求められる。

第二に、現時点で2050年程度まで長期展望すると、貯蔵の必要が単調に増大し続けるケースから、消滅していくケースまで、多様な状況が想定可能であり、これらに柔軟に対処できることが必要となる。予測に介在する不確実性を除去していく努力とともに、貯蔵技術が外部の状況変化に応じてその貯蔵能力、搬入・搬出能力等において十分な対応力を確保していることが必要である。

最後に、将来の貯蔵需要を規定する最大の要因が第二民間再処理工場にあることである。とくに、現在計画されているMOX燃料の軽水炉への装荷(プルサーマル)により、MOX使用済燃料が発生することになるが、これは第二民間再処理工場で再処理されるよう想定されている。第二民間再処理工場の実現如何によっては、この蓄積が長期にわたって存在していくことになる。このように、今後の貯蔵需要は、単に量的な面だけでなく、燃料の仕様や組成、排出年度及び貯蔵対策対象としての存在期間などにおいて多様性が増していくと言える。このことは、貯蔵施設だけでなく発電所からの搬出、輸送、再処理を含めた「使用済燃料管理」全体の問題として、最も経済的、安全でかつわが国原子力開発利用計画に照らして適切なあり方を立案し選択することが要請される。その中で、使用済燃料の発生・処理という「貯蔵の両側の不確実性」に対処する要として、使用済燃料貯蔵が柔軟かつ機動的なバッファ機能を果たすことが不可欠である。

表8-1-1 使用済燃料貯蔵対策必要量⁽³⁾

(単位：トンU)

項目	期間	1997-2010年度	2011-2020年度
使用済燃料発生量(a)		15,200	16,000
再処理工場(六ヶ所)搬出量(b)		5,900	8,000
海外搬出量(c)		70	
発電所内貯蔵量(d)		5,300	4,200
貯蔵対策必要量(a-b-c-d)		3,900	3,800
貯蔵対策必要量の累計		3,900	7,700

注：(a)～(d)及び貯蔵対策必要量は当該期間中の合計
四捨五入の関係で、累計値が各項目の数値の合計と一致しない場合がある。

表8-1-2 2050年時点の使用済燃料存在量及び対策必要量の一試算

試算ケース	ウラン使用済燃料	新ウラン使用済燃料	MOX使用済燃料	合計(A)	発電所内収容可能量(B)	貯蔵対策必要量(C=A-B)	第2再処理2020年稼働	貯蔵対策必要量の幅
1	0	39,000	10,000	49,000	24,000-27,000	22,000-25,000	/	0-25,000
2	7,000	30,000	11,000					
3	0	21,000	13,000	34,000		1,000-7,000	8,000	
4	0	23,000	11,000					

試算ケース設定

- 古いウラン使用済燃料（低燃焼度）を優先して再処理、第二民間再処理設置せず
- 新しいウラン使用済燃料（高燃焼度）を優先して再処理、第二民間再処理設置せず
- 2030年に第二民間再処理稼働、古いウラン使用済燃料を優先、MOX使用済燃料再処理せず
- 2030年に第二民間再処理稼働、MOX使用済燃料・古いウラン使用済燃料の順に優先して再処理（以下は各ケース共通の仮定）
 - 原子力発電設備容量は2010年に約70GWe、2050年に約90GWe
 - 2050年の発電所内収容可能量は、貯蔵容量原単位を現状並み（約270tU/GWe）及び若干の拡張（300tU/GWe）として概算した。
 - 第二民間再処理工場の設備容量は800[tHM/年]とし、2030年に稼働開始するものとした。2020年稼働開始による影響としては、10年早く稼働することにより、累積処理量が800[tHM/年]*10年=8,000[tHM]増加すると仮定した。
 - ウラン燃料は1992年までは低燃焼度（平均33,000Mwd/tU）、以降は全て高燃焼度（平均45,000Mwd/tU）が装荷されるものと仮定した。

8 - 2 貯蔵の経済性

使用済燃料(リサイクル資源燃料)の中間貯蔵に対するニーズが高まりつつあり、平成10年6月11日通産省総合エネルギー調査会原子力部会において、リサイクル燃料資源中間貯蔵施設を実現していくために、国においては法制度の整備等を、事業者においては施設の立地に向けた取り組み等を早急に進めることが肝要であるとの見解が示された。これにより、サイトや貯蔵方式の選定、事業運営コストなど、使用済燃料の発電所敷地外貯蔵の実用化に向けた検討が本格化しつつある。

本研究では、「使用済燃料敷地外貯蔵にかかわるコストを試算し、貯蔵方式間の技術経済性比較を行うとともに、貯蔵期間などをパラメータとした評価を行い、実用化検討に資する事」を目的に下記の成果を得ている。

8-2-1 金属キャスク貯蔵方式と水プル貯蔵方式の比較⁽²⁾

(1) 経済性の指標

経済性の指標として貯蔵単価(1単位の使用済燃料を貯蔵するのに必要な費用：円/kgU)を用いた。貯蔵単価は、当所が従来より使用済燃料貯蔵経済性評価に用いてきた、割引現金収支法に基づく均等化コスト⁽⁴⁾、

*1)とした。

(2) 評価の前提条件(図8-2-1、図8-2-2)

- 対象貯蔵施設：水プル貯蔵、金属キャスク貯蔵を対象とする。
- 燃料条件：燃料の燃焼度は40GWd/tとした⁽⁵⁾。なお、BWR燃料とPWR燃料の貯蔵量は発電容量の比率とし55:45とする。
- 貯蔵容量・期間：3000tU/5000tU/10000tU・40年
- 割引率*2)：5%/年

*1)均等化コストの算出方法

設定した使用済燃料中間貯蔵シナリオに沿って発生する施設の建設費・運転費等の支出(Ct)を基準時点における価値に換算した総額[$C_t/(1+i)^t$]が、貯蔵の収入(一定の貯蔵単価(C)×貯蔵施設への使用済燃料の搬入量(Qt)をT年における価値に換算した総額[$Q_t/(1+i)^t$]に一致するように、次式によって貯蔵単価を求めた。

$$C = \frac{\sum_{t=0}^N C_t / (1+i)^t}{\sum_{t=0}^N Q_t / (1+i)^t}$$

ここで、

C：実質価格表示の貯蔵単価〔円/kgU〕

Ct：t年における発生費用（実質価格表示）〔円〕

Qt：t年における貯蔵施設への使用済燃料搬入量〔kgU〕

i：実質割引率〔1/年〕

t：設定した貯蔵シナリオにおいて費用が発生する年

*2)割引率

将来発生する費用に対して、現時点で、いくら用意しておけばよいか（現在価値換算）を求める際に、事業の業績、物価上昇、金利等を加味して設定する値。たとえば、10年後に100万円の費用が発生することが予想される場合、割引率を5%とすると100万円/(1+0.05)¹⁰ 61万円を現時点で用意しておけばよいことになる。

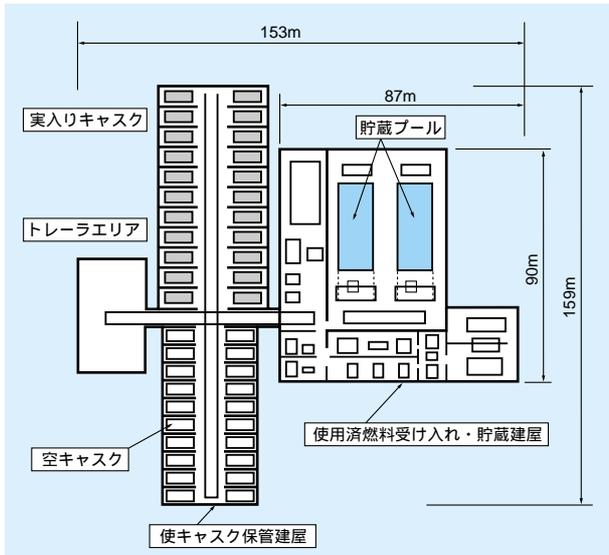


図8-2-1 プール貯蔵施設の概要(貯蔵容量 5,000tU)

(3) 評価結果

① 貯蔵方式、貯蔵容量が経済性に及ぼす影響

貯蔵容量が小さい場合、プール貯蔵の貯蔵単価は金属キャスク貯蔵に比べて高いが、容量が増加するにつれて、キャスク貯蔵の貯蔵単価(30,000円/kgU)に近づくことがわかった(図8-2-3)。これは、プール貯蔵では、貯蔵容量の増大に伴う費用の線形的増加がないこと(規模の経済性)が要因になっている。キャスク貯蔵の場合には量産効果によるキャスク制作費の若干の低減を見込んでいるが、本質的には、貯蔵規模の増加に対して貯蔵ユニットを追加していく費用構造のため規模の経済性はなく貯蔵単価が貯蔵容量によらずほぼ一定値となる。

② 金属キャスク費用が経済性に及ぼす影響

金属キャスク貯蔵では貯蔵単価の中で金属キャスク費用が約80%程度を占めており、そのコストダウンが貯蔵単価の低減に効果的であることがわかった(図8-2-4)。

③ 発電原価への影響

貯蔵単価を、貯蔵で対象とした燃料から発生した電力量に割り戻したコスト(貯蔵コスト)[円/kWh]を試算した。貯蔵コストは冷却年数5年の場合、キャスク貯蔵でkWhあたり9銭程度、プール貯蔵で15銭程度となった(表8-2-1)。貯蔵技術ないし貯蔵シナリオによる差違は一見大きいですが、平成11年12月の資源エネルギー庁総合エネルギー調査会原子力部会で報告されたフロントエンドからバックエンドまでを含めた総発電原価5.9円/kWhのうち1.5%(金属キャスク)から2.5%(プール)程度の値となっている。

④ 感度解析(割引率が貯蔵単価に及ぼす影響)

本評価では割引率を5%として計算したが、公益性の高い貯蔵事業の場合には5%は高いとの批判もありえるので、割引率を0%、2%とした場合、また事業主体として民間による倉庫業等の事業形態も想定し、8%、10%とした場合について検討した。その結果、本評価の設定条件の下では、割引率の変化による貯蔵単価の変動は比較的小さい事がわかった(図8-2-5)。

また近年、新たな貯蔵方式として、コンクリートモジュール貯蔵方式が、主に米国で実用化しており、これらを含めた経済性評価を行い、その経済性を明らかにしている(8-5参照)。

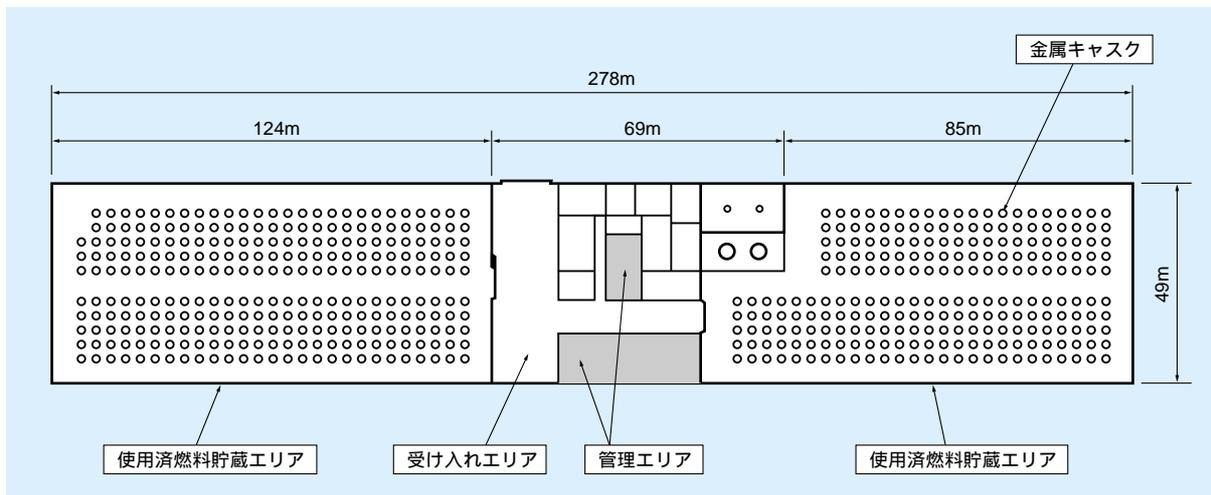


図8-2-2 キャスク貯蔵施設の概要(貯蔵容量 5,000tU)

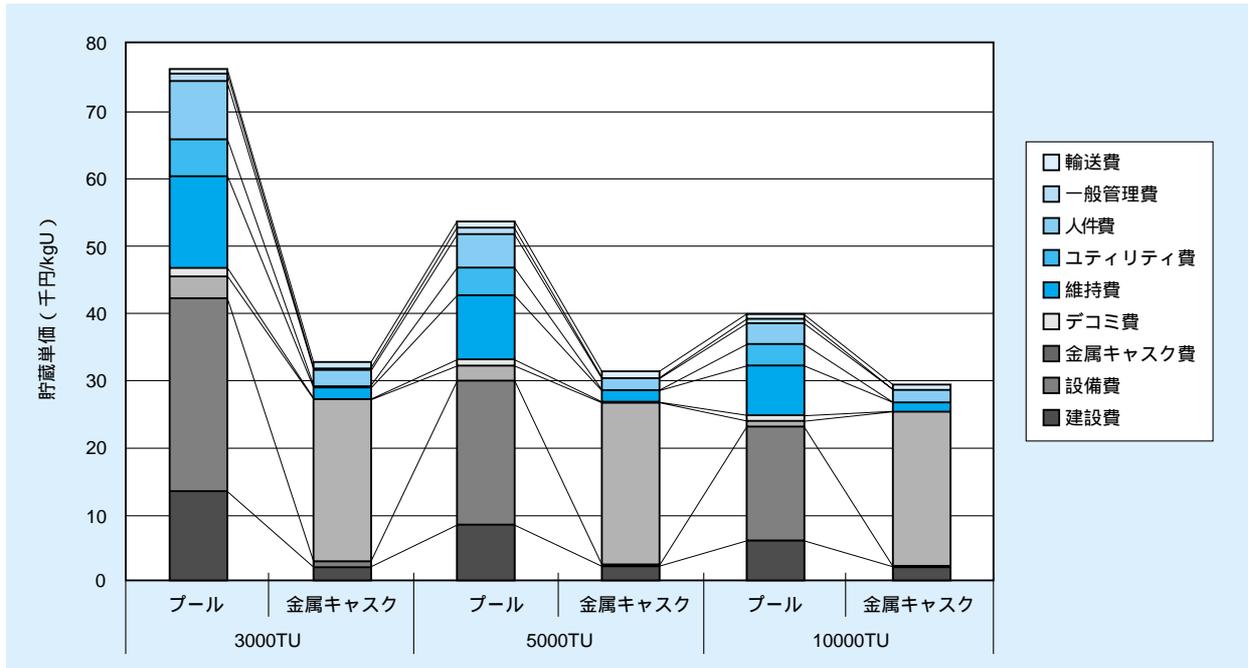


図8-2-3 貯蔵単価の比較

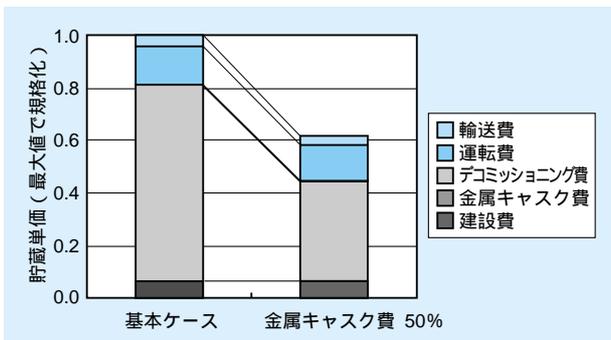


図8-2-4 カスク費用と貯蔵単価

表8-2-1 貯蔵コスト [円/kWh]

貯蔵容量	3,000tU		5,000tU		10,000tU	
	5年	15年	5年	15年	5年	15年
カスク	0.095	0.058	0.091	0.056	0.085	0.052
プール	0.214	0.132	0.150	0.092	0.112	0.069

■ : 平成10年6月11日通産省原子力部会で報告

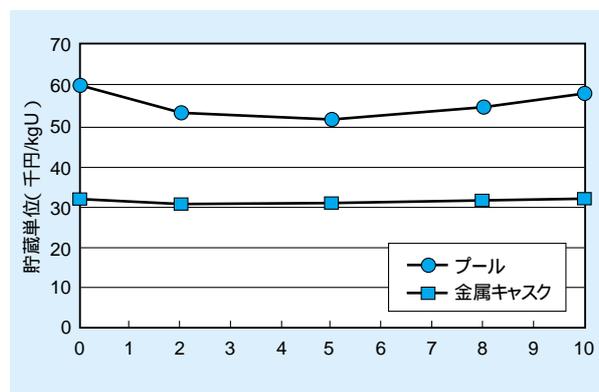


図8-2-5 割引率に関する感度解析(5,000tU)

8-3 金属キャスク貯蔵技術確証試験 - 通常時健全性 -

当所では、わが国における使用済燃料のキャスク貯蔵に関する研究を昭和58年度より鋭意実施してきた。本研究では、「使用済燃料のキャスク貯蔵に関する研究成果を総合的かつ系統的に整理・集大成し、総合的な考察を加え、キャスク貯蔵技術の安全性を明らかにし、その許認可に資する事」を目的として下記の成果を得ている⁽¹⁾。

8-3-1 使用済燃料の健全性

貯蔵キャスク内の使用済燃料の温度を精度よく求めるための解析手法(改良ABAQUSコードを使用)を開発し、実物大の貯蔵キャスクで検証した。また、貯蔵中の使用済燃料の健全性を支配する因子が被覆管のクリープ(内圧による膨れ)変形であるとし、過度な(1%以上の)クリープ変形を抑制する限界温度の評価手法を提案した。

8-3-2 貯蔵キャスクの密封性能⁽⁷⁾

(1) 長期健全性

貯蔵キャスクの密封部に使われる金属ガスケットの漏洩率変化に関して、温度による加速試験の結果に基づき、長期密封性能の評価手法を提案した。これにより、金属ガスケットは百年以上の間、所期の密封性能を維持することを予測した。

また、2種類の実物大蓋部モデルを用いた密封性能確証試験を開始し、試験開始から約8年以上が経過したが(図8-3-1参照)、いずれのモデルも試験開始時の良好な密封性能を保持していることが確認された。また、本試験は、一定温度で実施したのであり、実貯蔵時の使用済燃料の崩壊熱の経年変化に伴うキャスク温度低下を考慮すると、現時点において約23年に相当する密封性能の健全性が示されたと考えられる。

(2) 環境温度変化が密封性能に及ぼす影響

キャスク温度は、貯蔵環境温度の季節変動に伴って

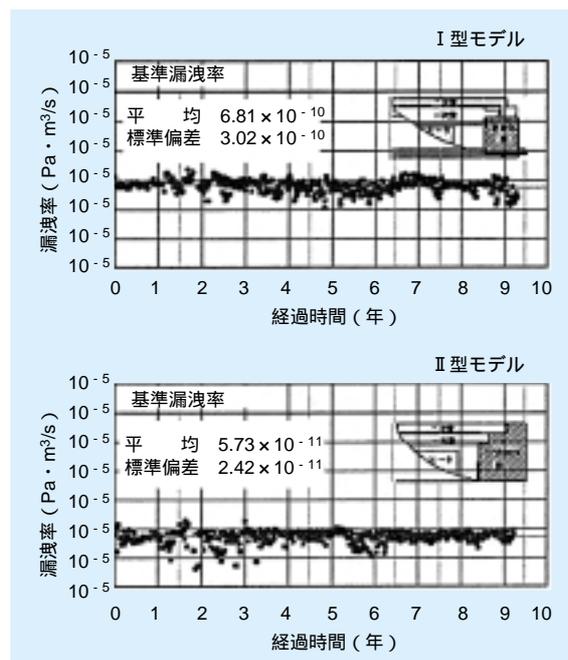


図8-3-1 金属ガスケットの長期密封性能試験

変化するため、蓋ガスケット部温度の年変動に相当する温度サイクルを繰り返し与える温度サイクル試験を行い、温度変動が密封性能へ及ぼす影響を確認した。

その結果、繰り返し数60回(60年に相当)の範囲では、密封性能に変化がないことが確認された。したがって、貯蔵期間中において、貯蔵環境の温度変化の密封性能への影響はないものと考えられる。

8-3-3 貯蔵施設の除熱性能

当所では、乾式の自然空冷式中間貯蔵施設について、これまでに除熱評価手法の確立を目指し、試験・研究を実施してきた^{(18)、(19)、(20)、(21)}。

当所が最初に試験・研究した施設の形状は、天井の高い施設(以降「従来方式施設」という)であったが、現在では、建設コスト低減と建設期間短縮を目的として天井を低くした施設(以降「スタック方式施設」という)が検討されて、本報告では、この新しい施設を対象とした研究成果を紹介する⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。図8-3-2にスタック方

式施設の形状を示す。スタック方式施設については、除熱性能が確認されていないことから、除熱評価が必要となっている。

(1) 除熱性能試験

スタック方式施設の施設内熱流動現象を評価し、熱的健全性を考慮して施設の基本形状(天井高さおよびスタック高さ)を検討するために、実規模施設の1/5縮尺模型を用いた試験を行った。なお、模型と実規模施設との間で浮力と慣性力の比であるリチャードソン数(Ri数)を一致させ、更に施設内を流れる冷却空気の流れが十分乱流になる条件で試験をすることにより、実規模施設と熱流動上相似の現象を再現した。その結果、以下の事が明らかとなった。

- 1) スタック高さとRi数の関係を求め、Ri数をパラメータとした試験を行った。貯蔵部内の熱流動現象は、Ri数に大きく依存することが分かった。また、除熱上必要なスタック高さを検討した。
- 2) 天井高さをキャスク高さの約1.5倍(1.6m)から約3倍(3.0m)まで変えた試験を行い、天井高さが貯蔵部内の熱流動現象に及ぼす影響および天井温度を調べた。その結果、天井高さは、キャスクの除熱特性に、ほとんど影響を及ぼさないことが分かった。しかしながら、天井高さにより天井温度が変化することから、天井のコンクリート温度を評価して、天井高さを決める必要があることが分かった。
- 3) キャスク表面近傍では、浮力による上昇流の他に吸気口から流入する水平方向の吹きつけ流が付加されている。この結果、キャスクの熱伝達率は、従来用いられてきた垂直平板自然対流(層流)の評価値より

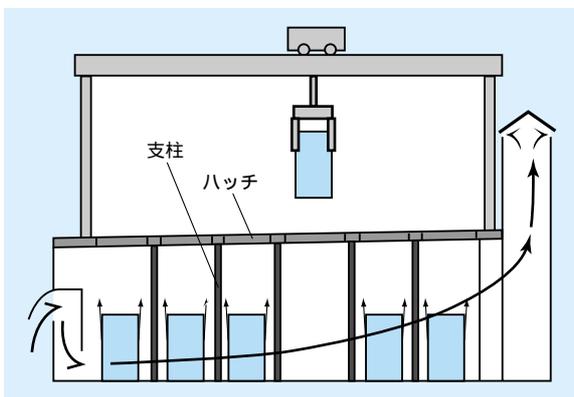


図8-3-2 キャスク貯蔵施設の断面図

も大きくなることが分かった。

- 4) 図8-3-3は、試験結果に相似則を適用して、実規模施設貯蔵部内の空気温度分布を予測したものである。

(2) 除熱性能試験解析

1/5縮尺模型試験で見られた諸現象の詳細把握と、除熱性能解析手法の高度化を目的として、試験解析を行った。

ここでは、貯蔵部内の熱流動現象を対象とした全体解析および最も高温となる最終列キャスクを対象とした詳細解析を行った。なお、詳細解析では、キャスク周囲の熱流動現象およびキャスク表面温度を評価した。解析に当たっては、当所でこれまでに開発してきた手法に基づいて、更に空間分解能を向上させたメッシュ分割法およびSkew-Upwind法^{注1)}を導入した。これにより以下の結果を得た。

1) 全体解析結果

図8-3-4に試験解析で得られた貯蔵部内の温度分布の一例を示す。吸気口から流入した空気は最上流側のキャスクに衝突し、一部上昇するものの、主流は、最終列キャスク方向へ床を沿って流れた。また、天井部付近での戻り流、貯蔵部内の最下流部での淀みなど、試験で観察された現象が再現されている。解析の結果、貯蔵部内の温度分布、流速分布ともに試験値と良く一致した。更に、天井高さの低いケースの解析では、キャスクで加熱された高温空気が天井付近に留まり、天井の広い範囲が高温化することが分かった。

2) 詳細解析結果

キャスク後背部では、流れのはく離現象が生じた。

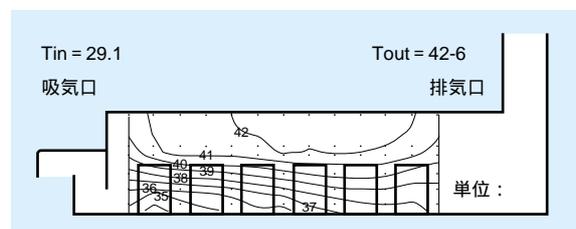


図8-3-3 実規模施設貯蔵部内の空気温度分布(相似則を適用した予測値)

注1) : この方法は流跡線法あるいは特性曲線法と呼ばれるもので、上流側差分点の中に斜め方向の格子点情報も含めるため、数値計算において重要となる接線(流れに垂直)方向の数値粘性を大幅に低減できる。

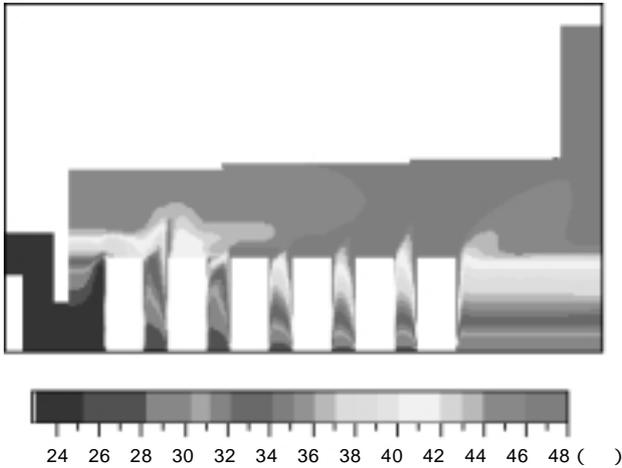


図8-3-4 貯蔵部の温度分布（試験解析）

*巻末のカラー頁を参照。

キャスク表面温度は、解析では試験結果と比べて周方向の温度差が大きくなった。これは、詳細解析での境界条件に全体解析で得られた温度・流速データを用いているが、解析では水平方向流速を大きく評価しているため直交流による除熱が過度に評価されたものと考えられる。

8-3-4 チャンネルボックス付き使用済燃料の貯蔵⁽⁹⁾

従来、BWRタイプの使用済燃料は、チャンネルボックスと燃料集合体を分離した後、個々に貯蔵・管理しているが、当所では、チャンネルボックス付き使用済燃料の合理的な貯蔵に向けた試験データを取得した。

8 - 4 金属キャスク貯蔵技術確証試験 - 異常時健全性 -

8-4-1 貯蔵キャスクの取扱中の落下時の健全性⁽¹⁾

貯蔵キャスクが取扱中に誤って、貯蔵施設のコンクリート床上に落下しても、キャスクの構造的健全性および密封性能が維持されることを、実物大キャスクを用いた試験により確証した。また、衝撃解析コードDYNA - 3Dに、当所での既開発のコンクリートの破壊モデルを組み込んだコードを開発し、その評価手法を提案した。

また、鋳鉄製キャスクの材料データを取得整備し、衝撃による脆性破壊について評価する手法を提案し、実物大キャスクの試験により検証した。これにより、JISの材料規格⁽¹⁰⁾やIAEAの脆性破壊評価基準⁽¹¹⁾が策定された。

8-4-2 地震時の健全性⁽¹⁰⁾

(1) 地震により貯蔵建屋が崩壊し、貯蔵キャスク上に

重量物が落下しても、キャスクが堅固な強度を有することから、その構造的健全性および密封性能が維持されることを実験により明らかにするとともに、衝撃解析コードDYNA - 3Dによる解析手法を提案した。

(2) 建屋倒壊に伴い瓦礫中に貯蔵キャスクが埋没した場合には、使用済燃料等は異常な温度上昇を示すが、使用済燃料等の健全性が維持されうる限界時間の評価手法を提案した。これにより、埋没により空気の流れが閉ざされた場合にも、埋没後、ガレキ類を撤去して対流を回復する時間的余裕があることを示した。

(3) 縦置きされた貯蔵キャスクは最大規模(S₂クラス)の地震に対しても転倒しないことを解析・試験により明らかにした。

8 - 5 高燃焼度・MOX 使用済燃料貯蔵技術

将来の動向としては軽水炉の高燃焼度化が順調に進展し、今後発生する使用済燃料は、高燃焼度燃料が主体になると予想される。さらには、高速増殖炉の実用化の遅れに伴い、軽水炉におけるプルサーマル利用の方針が決定され、貯蔵の対象として従来の燃焼度の低い使用済燃料以外に、高燃焼度燃料と混合酸化物(MOX)燃料を想定しておく必要が生じている。これらの使用済燃料は初期濃縮度が高く、放射能、発熱量が高いので、従来技術のままでは貯蔵密度の低下、ひいては貯蔵コストの上昇が避けられない。

本研究では、「軽水炉燃料の高燃焼度化、軽水炉におけるプルサーマル利用の本格化に対応するため、これらの燃料を対象とした貯蔵コストの低減を目指す事」を目的として下記の成果を得ている。

8-5-1 使用済高燃焼度燃料・MOX 燃料の基本特性^{(12)、(23)}

BWRおよびPWR燃料について、ORIGEN - 2による線源評価を実施した。特に、MOX使用済燃料では、ウラン使用済燃料に較べて、中性子放出率が約18倍と顕著に増加するほか、発熱量なども2倍程度に増加する事が示された。

8-5-2 燃焼度クレジットの検討並びに使用済燃料特性試験⁽¹²⁾

高燃焼度・MOX使用済燃料などに対する貯蔵技術の高度化のため、実際の高燃焼度、MOX使用済燃料を用いた照射後試験により、

- ・使用済燃料の核種組成評価
- ・使用済燃料の線源評価
- ・使用済燃料の健全性評価

などに寄与する各種データを取得した。特に、核種組成評価および線源評価において、現在広く用いられて

いるORIGEN2コードを対象として、高燃焼度、MOX使用済燃料に対する評価精度を明らかにした。また、MOX使用済燃料の照射後試験により貯蔵時に問題となる被覆管の内面腐食量や、温度上昇時の核分裂性ガス放出挙動などについて、従来のウラン燃料と同等か同等以上の健全性が担保出来る事を示した。

キャスク等の貯蔵施設の設計の合理化への寄与が期待される燃焼度クレジットについて導入方策を検討し、燃料棒の軸方向の燃焼度分布や運転パラメータのキャスク反応度への影響を解析し、これらの各種のバイアスを等価均一燃焼度の概念で統一的にとりまとめ得る可能性を示した。また、幾つかの燃焼度クレジット導入方策を比較評価し、導入のためのフロー・チャートを明らかにした。

8-5-3 高性能バスケット用中性子吸収構造材の材料特性⁽¹³⁾

①ボロン含有ステンレス鋼、②ボロン含有3層クラッド材(ボロン含有ステンレス鋼/銅/ボロン含有ステンレス鋼)、③ボロン含有アルミニウム合金、を対象にバスケット用中性子吸収構造材料としての適用性を検討するとともに、基準化等に必要の材料データを整備した。

① ボロン含有ステンレス鋼

ボロンの添加により0.2%耐力と弾性率は増加、引張強度、延性、衝撃値、曲げ変形性等は減少した。特に1.4wt%のボロンを含有した材料は引張強度、衝撃値の著しい低下が認められた。クリープ特性、疲労特性、熱的性質等はあまり変化が見られなかった。組織的には折出したボロン化合物の圧延方向への分布が見られたが、材料特性の顕著な異方性は認められなかった。また、溶接部では、溶接施工性は母材のSUS304鋼と変わらず、母材部と比較して引張強度の変化は見られなかったが、曲げ変形性の低下が認められた。バスケット用構造材としてのボロン含有ステンレス鋼では、延性確保の観点からボロンの添加は1.2wt%程度以下がの

ぞましいと考えられる。

② ボロン含有3層クラッド材

引張強さはボロン含有ステンレス鋼との複合則の成立が示され、曲げ性の低下が認められた。また、溶接部でも曲げ性の低下が認められた。伝熱性能はボロン含有ステンレス鋼と比較して、著しい向上が認められた。

③ ボロン含有アルミニウム合金

ボロンの添加により、衝撃吸収エネルギー、伸び、曲げ性等の低下が確認されたが、引張強度、硬さおよび熱的性質等は母材とほとんど変わらなかった。また、母材が熱処理型の A6061 合金であるため、1000 時間の温度履歴付与後では、引張強度、0.2 % 耐力は初期の半分以上に低下することが確認された。温度履歴付与により、吸収エネルギーは増加が認められた。温度履歴付与による強度低下は、バスケットの設計時においては十分に配慮する必要がある。

本研究で試作したボロン含有ステンレス鋼、ボロン含有アルミニウム合金それぞれについて、ボロンの添加による延性の劣化が確認された。これは、添加したボロンが、ステンレス鋼中においてもアルミニウム合金中においてもほとんど固溶せず、その大部分が化合物として母相中に析出するためである。できるだけ細かく分散析出するように製造時に制御することが、材料特性を向上させる上での今後の課題である。

また、ボロン含有アルミニウム合金では、ボロン系化合物の析出による熱中性子吸収効果の低下も予想された。今後、これらの材料を使用する場合には、このような特性を理解した上で適用することが重要である。

8-5-4 高性能バスケットの伝熱特性試験⁽¹²⁾

3層クラッド材(ボロン含有ステンレス鋼/銅/ボロン含有ステンレス鋼)からなる高性能バスケットの除熱性能が従来タイプのステンレス鋼製バスケットに比べて向上することをスケールモデルの試験体を用いた伝熱試験により確認した。すなわち、本試験体系の場合、3層クラッド材からなるバスケットを用いた伝熱試験では、中心位置の模擬発熱体の最高温度が 249 となり、ステンレス鋼製のバスケットを用いた場合に比較して約 85 下回ることが確認された(但し、充填ガスは

ヘリウムで横置き姿勢の場合)。

さらに、3層クラッド材を構成している材料間の熱膨張係数の違いによる不具合等は認められないとともに、バスケットには、熱応力に起因するひび割れも認められなかった。

8-5-5 密封部の耐食性評価⁽¹²⁾

1) 蓋と本体間の腐食によるボルトの押し上げ効果

キャスク貯蔵中に蓋部と胴部(本体)との間に結露等による腐食が生じると、その腐食生成物の成長によりボルトが押し上げられ、密封性能に影響を与えることが考えられる。そこで、腐食生成物の成長に伴うキャスク蓋部とキャスク胴部(本体)との間の面圧の経時変化を実験時に求め、これにより実機の 40 年間(貯蔵期間)における面間隔の広がりを推定し、密封性能への影響を評価した。

その結果、40 年相当の貯蔵期間では、ボルトが降伏応力を越えて破断に到ることはなく、また、面間隔の広がりによってキャスクの気密性が失われることはないと考えられる。

2) 蓋、本体とガスケット間の腐食寿命

自然環境暴露試験および加速環境下での腐食試験を行い、加速倍率を求めるとともに、求めた加速倍率を加速環境下での密封部小モデル試験結果に適用し、実機の自然環境における 40 年間(貯蔵期間)の密封性能を予測した。その結果、40 年相当の貯蔵期間では、密封健全性が失われることはないと考えられる。

8-5-6 金属キャスク破壊強度評価手法の高度化⁽¹²⁾

(i) 破壊靱性値に及ぼす破壊モードの影響検討⁽¹⁴⁾

貯蔵キャスク用鋳鉄および鍛鋼の破壊靱性値に及ぼす破壊モードの影響を調べるために、破壊モード試験を行い、鋳鉄、鍛鋼ともに、 $K_{IC} < \text{あるいは}$ $K_{IIC} < K_{IIIC}$ 、 $J_{IC} < \text{あるいは}$ $J_{IIC} < J_{IIIC}$ の関係が得られ、モード I の破壊靱性値が最も低く、最も厳しい評価を与えることが確認できた。

(ii) 実キャスクを想定した大型構造物としての破壊特性

鋳鉄および鍛鋼の試供体より切出した表面予き裂ならびに板厚貫通予き裂付き試験片を用いて、最も厳しい評価を与える引張負荷および引張曲げ条件下での大型破壊試験を実施し、J - 歪み関係、き裂の取扱い方等、J積分設計曲線を求めるのに必要なデータを取得した。

(iii) 設計曲線の提案⁽¹⁵⁾

鋳鉄および鍛鋼の各種破壊靱性試験で得られたデータを基に、J値の基準化や、基準歪の設定方法等を検討し、J積分に基づく設計曲線(非線型破壊強度評価式)を提案するとともに、落下事象を例として実機への適用方法を紹介した。

8-5-7 新要素技術を導入した使用済燃料貯蔵方式の経済性比較⁽¹²⁾

プール、金属キャスク、ボールド、サイロおよびコンクリートキャスク貯蔵方式の概念設計を行うとともに、上述した要素技術を適用した場合の効果について検討した。

その結果、燃焼度クレジットの導入が貯蔵密度の向上や経済性に大きな効果を及ぼすことがわかった。ただし、燃焼度クレジットの導入は運用等の面で課題も多いことから燃焼度クレジットが導入できない状況ではボロン含有ステンレス等の適用が有効な手段であると考えられる。また、サイロ貯蔵、コンクリートキャスク貯蔵は貯蔵コストが低く有望な方式であることがわかった(図8-5-1)。サイロ貯蔵やコンクリートキャスク貯蔵については海外での実績はあるものの我国ではまだ実用化されていないので、使用済燃料貯蔵方式のオプションを拡げるという観点からも我国での実用化に向けた研究・試験が望まれる。

8-5-8 貯蔵技術の長期健全性

仏では2006年のバックエンド政策決定に向けて、300年間の長期貯蔵研究が行われている⁽²⁴⁾。

当所では、使用済燃料の岩盤貯蔵概念の予備的検討を行った⁽²⁵⁾。

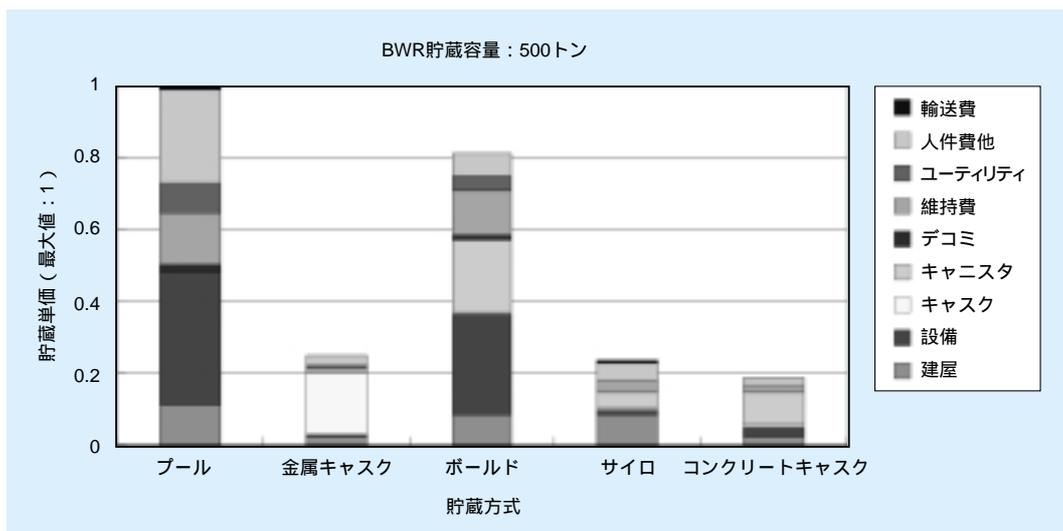


図8-5-1 燃焼度クレジット等の新要素技術を導入した場合の経済性評価例