

使用済燃料輸送貯蔵兼用キャスクの開発

丸岡 邦男^{*1} 甫出秀^{*1} 大園勝成^{*2} 久利修平^{*2} 松岡寿浩^{*2} 浅田和雄^{*3} 斎田富兼^{*3} 坂口康弘^{*3}
赤松哲朗^{*3} 名島憲治^{*3} 太田英之^{*3} 入野光博^{*3} 入江隆之^{*3}

輸送貯蔵兼用キャスクとしてより高性能かつ信頼性向上を図ったMSFシリーズキャスクを開発した。特に貯蔵の観点から、経年劣化が少なく長期間高い信頼性を確保するため、本キャスク向けに新材料を開発、採用した。また、経済性の観点から、様々な構造上の工夫を行いキャスクへ収納できる燃料集合体数の増加を図った。主な特徴は以下である。

バスケット

粉末冶金製法により均質で、熱処理による強化行わないことで長期劣化の少ないボロン添加アルミニウム合金を採用した。また、BWR向けでは、角パイプ集合型のバスケットとし構造の簡素化を図った。

中性子しゃへい材

中性子しゃへい材に含まれる原料を見直し、長期耐久性を向上した。

胴

底付き一体型鍛造法を開発し、溶接線を排除することで信頼性向上を図った。また、内面をバスケットに沿うよう角型とすることでバスケットと胴とのギャップを小さくして除熱性能を向上させた。

これらは、実証試験を行い、健全性を確認している。

Keywords: 使用済燃料、輸送貯蔵兼用キャスク、バスケット、中性子しゃへい材

Mitsubishi Heavy Industries have developed high performance and reliable transportable storage casks, MSF series casks. The casks have employed newly developed materials that have been expressly developed to obtain long-term stability and quality. Furthermore, the casks have been employed newly designed structure to maximize payload of accommodating fuel assemblies in order to increase economic efficiency of storing spent fuels. The casks have been applied the following technologies.

Basket assembly of the cask is made of newly developed boronated aluminum. The boronated aluminum is manufactured by powder metallurgy process to provide uniformity of metallic structure and artificial aging which causes deterioration under high temperature condition is not applied to provide the boronated aluminum with high stability for long-term use. For the cask for BWR fuel, simplified basket whose design is that basket consists of some individual square pipes without assembling is adopted in the cask.

Neutron shielding material of the cask is made of newly resin of which raw materials have been modified to improve durability.

Monolithic forging method which is how to shape steel into vessel form is developed to skip welding process between body shell and base plate and to improve reliability.

Internal face of the body forging is machined to provide "steps" in its cross section in order to fit the external shape of basket assembly and so heat dissipation performance is greatly improved.

The new technologies have been done demonstration test in order to confirm that MSF series casks satisfy transport regulations.

Keywords: Spent Fuel, Transportable storage cask, Basket, Neutron shielding material

1 はじめに

原子炉で照射された燃料は、再処理により再び燃料として使用することができるリサイクル燃料である。資源に乏しい我が国にとって、このリサイクル燃料を安全かつ経済的に貯蔵することが重要である。三菱重工業では、次世代の輸送貯蔵兼用キャスクとしてより高性能かつ信頼性にも優れたMSFシリーズキャスクを開発した。本キャスクには、多くの新技術を開発、適用しており、その概要を紹介する。

2 MSFシリーズキャスクの概要

今回開発したMSFシリーズキャスクは、発電所構内だけでなく発電所敷地外に立地されるリサイクル燃料貯蔵施設での使用も前提とし、貯蔵施設で燃料の入れ替え作業が不要となるよう、輸送と貯蔵と兼用できる設計である。MSFキャスクは安全性確保の観点から、IAEA輸送規則に要求される想定事故を模した試験条件においても安全性を確保できるように設計されている。また、貯蔵に対しても通産省告示501号の第一種容器他に準拠した設計が行われている。特に、貯蔵においては長期間連続して使用されることが想定されることから、経年劣化が少なく長期間高い信頼性を確保するため、本キャスク向けに新材料を開発、採用した。経済性向上の観点では、キャスクは発電所などの取り扱われる建屋設備の都合から、大きさ、重量が制限されるため、この制約の中で収納できる燃料集合体数を多くすることが必要で、様々な構造上の工夫を行った。

MSFキャスクの設計例をFig.1, Table 1に示す。キャスクは、本体、バスケット、一次蓋、二次蓋、緩衝体から成り立っている。本体は、炭素鋼製の胴と外筒があり間に

Development of high capacity transportable storage cask, by Kunio Maruoka (kunio_maruoka@hq.mhi.co.jp), Suguru Hode, Katsunari Ohsono, Shuhei Kuri, Toshihiro Matsuoka, Kazuo Asada, Tomikane Saida, Yasuhiro Sakaguchi, Tetsuro Akamatsu, Kenji Najima, Hidenori Ohta, Mitsuhiro Irino, Takayuki Irie
*1 三菱重工業株式会社原子力事業本部 原子力技術センター
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nuclear Engineering Center, Nuclear Energy System Headquarters,

〒220-8401 横浜市西区みなとみらい13丁目3番1号

*2 三菱重工業株式会社神戸造船所 原子燃料・バックエンド設計部
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Kobe Shipyard & Machinery Works
Nuclear Fuel & Back-end Systems Designing Department

〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町1丁目1-1

*3 三菱重工業株式会社高砂研究所

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Takasago Research & Development Center
〒676-8686 兵庫県高砂市新居町新浜2-1-2

Table 1 Samples of specification of MSF series cask

Cask type	MSF-69B	MSF-32P
Fuel Assembly Type	BWR (With channel box)	PWR
Payload	69 Fuel Assemblies	32 Fuel Assemblies
Burnup	33 GWd/t	48 GWd/t
Cooling Time	10 years	10 years
Decay Heat Load	20 kW	26 kW
Outside Dimensions (Excluding Shock Absorbers)	2.6m × L 5.5m	2.4m × L 5.1m
Weight of Cask (Including Fuel Assemblies Excluding Shock Absorbers)	119 ton	113 ton

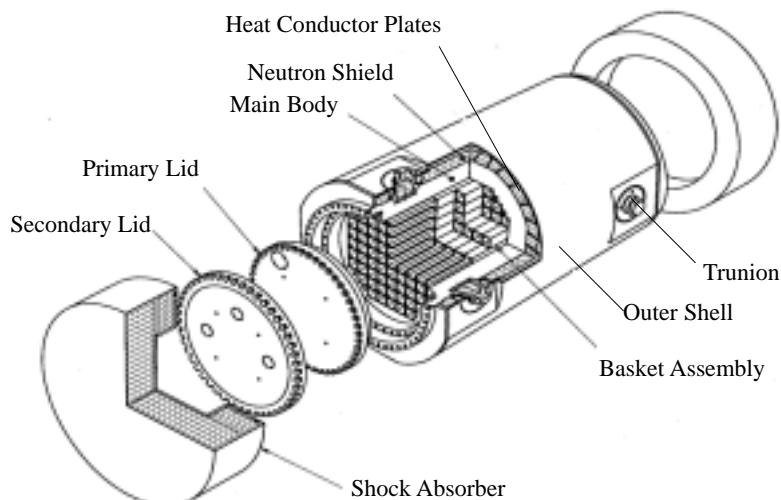


Fig.1 Cask external shape

中性子をしゃへいするための中性子しゃへい体（レジン）が設けられている。レジンは熱伝導率が小さいため、胴と外筒との間に銅製の伝熱フィンを設けてキャスクの除熱性を確保している。また、胴はそれ自身が主要なガムマ線しゃへい体であり、輸送時には一次蓋あるいは二次蓋とで放射性物質を閉じ込める密封境界を形成する。貯蔵時においては一次蓋の内側を密封境界とし、一次蓋、二次蓋間の空間を監視することで、一次蓋及び二次蓋のガスケットの密封健全性を監視できるようになっている。胴の内部には、臨界防止ためのボロンを添加したアルミニウム合金製のバスケットがあり、燃料集合体を保持する。緩衝体は、落下事故を想定した落下試験時において、衝撃エネルギーを吸収し、キャスク本体に加わる衝撃加速度を緩和し、容器を保護する。

本キャスクの特徴を以下に説明する。

2.1 バスケット

バスケットは、熱伝導性に優れかつ軽量である A6N01 アルミニウム合金に燃料の未臨界を確保するため、ボロン化合物である B₄C を 1~9wt% 添加したボロン添加アルミニウム合金製である。BWR 向けの場合、ボロン添加アルミニウム合金による角パイプを接合することなくそのままキャスク胴へ挿入したシンプルな構造のバスケットを採用した。

MSF シリーズキャスクに採用したボロン添加アルミニウム合金は、信頼性向上を目的に新たにキャスク向けとして開発したものであり、以下の特徴を有している。

1) 優れた材料特性とボロンの均質な分散

MSF シリーズキャスクに採用するボロン添加アルミニウム合金の製造には、粉末冶金法を採用した。アルミ粉末とボロンの化合物である B₄C 粉末を混合、プレス成形した

ビレットを押出機で所定形状に押出して製造する。そのため、従来の溶解したアルミにボロンを添加して製造する溶製法と比較して製造過程にアルミが溶解する工程自体が存在しない。したがって、溶湯が凝固する際に生じるボロンの偏析が原理的に発生しない。その結果としてより均質な材料を得ることができた。また、ボロンを微細に分散させることができるために、高濃度のボロンを添加しても材料の脆化を抑えることが可能となった。

この粉末冶金によるボロン添加アルミ材は押出成形性がよく、角パイプ形状に高精度で成形することが可能であり、BWR 向けバスケットでは角パイプを集合させただけのシンプルな形状を実用化することができた。

2) 長期高温下の使用に適した安定した強度

一般にアルミ材の多くは強度向上ため、熱処理(時効処理)を施して強化したものが使用されることが多い。しかし、時効強化処理されたアルミニウムは、キャスクバスケット材料の使用環境である 200 度の条件下で長期間保持すると焼戻し(過時効)により時効による強化作用が喪失、強度が低下する。そこで、本ボロン添加アルミニウム合金では強度低下防止するため、熱処理による強化は行っていない。さらに、設計に必要となる許容応力の策定には、長期加熱試験を実施し、高温環境下における強度低下がわずかであることを確認している。

2.2 本体構造

本体構造は、以下の特徴を有しており、熱伝導特性と信頼性の向上を実現した。

1) 溶接継ぎ手のない本体胴

胴は、溶接線のない一体型を採用している。通常、胴は、円筒部分と底板部分とを別々で鍛造し、溶接により容器形状に組み立てられる。しかし、本キャスクにおいては、鍛造により直接容器形状に成型する鍛造工法を開発、採用したため、溶接施工が不要となった。このため、従来、必須であった溶接施工時や、供用期間中の溶接線の検査が不要になるなど信頼性とメンテナンス性を向上させることができた。鍛造材の写真を Fig.2 に示す。

2) バスケットの直接支持

Fig. 3 に示すよう、本体胴内面は、内部のバスケットを直接支持できるよう、階段状に切削加工している。除熱性能の向上は燃料被覆管や、バスケットの温度を下げ、材料強度を向上させることができるため、キャスクの安全性確保の観点で重要である。バスケットは正方形セルの集合形状であるのに対し、従来のキャスクの場合、胴内面形状は円筒形であったため、バスケットと容器の間には扇形あるいはかまぼこ型の隙間が生じ、熱抵抗となっていた。そこで、本キャスクでは、胴内側に階段状の加工を施し、胴内面とバスケットとを密着させたため、除熱性能を向上させることができた。

3) 中性子しゃへい材



Fig.2 Forged steel for MSF series cask

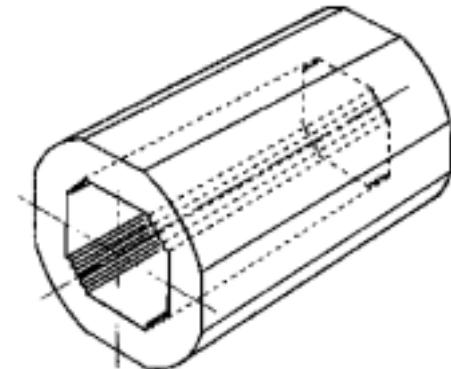


Fig.3 Main body for MSF

中性子線のしゃへいには、水素原子が有効であることから、キャスクの中性子しゃへい材として高分子材料のレジン(樹脂)が多く用いられている。キャスクでは中性子しゃへい材は 150 度の高温下で使用されるため、耐熱性に優れていることや、火災事故を想定して規定される輸送規則に基づく 800 環境 30 分間の耐火試験においてもキャスクの安全性を保つ必要から、自己消火性(難燃性)を有していることが必要である。近年は、中性子しゃへい材として比較的安価で高分子材料の中でも耐熱性に優れたエポキシ樹脂に中性子吸収材である B₄C とレジンに自己消火性を与える耐火材とを配合したものが主流となっている。

レジンは、高温下で長期間使用すると、徐々に水分が放出されて減損することから、しゃへい性能が劣化する。そのため、あらかじめ減損分を調査し、しゃへい評価に見込む必要がある。そのため、水分減損の小さなレジンが求められていた。

この劣化原因を調査した結果、耐火材に含まれる不純物が原因であることが判明した。耐火材の原料は、水酸化アルミニウムが多く用いられており、高温下で分解し、結晶水を放出する性質を持っていることから、この性質がレジンの自己消火性付与に利用されている。しかし、水酸化アルミニウムには製造時に不純物としてソーダ化合物が残

留されており、これが 150 以下の低い温度でも熱分解して水分を放出するため、レジンの水分減損の要因となっていた。そこで耐火材を改良しレジンの劣化原因となつてゐる不純物の割合を 0.1wt% 以下に抑えることとした。そのため、従来の中性子しゃへい材の場合、150 環境下での長期使用時における水分の減損は数% であったのに対し、170 環境で 60 年間使用しても水分減損率が、しゃへい体密度の 1% 以下にまで抑えることを可能とした。(試験結果の概要は以下で説明する。)

4) 金属ガスケットの採用

金属ガスケットは、経年劣化が小さく長期間にわたって密封性能を確保できることが確認されているが、金属製ガスケットは落下衝撃時の蓋のずれや口開きに対する追従性が悪いため、落下事故を想定して規定される輸送規則に基づいて必要となる 9m 落下試験においても安全性を担保せねばならない輸送向けのキャスクへの適用は難しい。一方、ゴム製のガスケットはフレキシブルであるため、蓋のずれや口開きに対する追従性はよい反面、経年劣化しやすく長期使用が前提の貯蔵キャスクへの適用は難しい。輸送時と貯蔵時で蓋のゴム、金属のガスケットを都度交換する構造もあるが、作業が必要で操作性が悪くなる。そこで、本キャスクにおいては、一次蓋と二次蓋の隙間を小さくするとともに、緩衝体が二次蓋表面を覆う構造にすることで、蓋開きに厳しくなる頭部垂直落下時には二枚の蓋の変形を緩衝体が拘束しガスケット部の変形を抑制する構造とした。また、水平落下時においても蓋ボルトの初期締め付け力を従来のゴム製ガスケットと比較して大幅に強化し、蓋とフランジの摩擦力が蓋の慣性力を上回るよう設計した。

3 実証試験

MSF キャスクに採用された設計、材料については実証

試験によりその妥当性を確認している。

3.1 材料試験

MSF シリーズキャスクにおいて採用されたボロン添加アルミニウム合金と中性子しゃへい材について、それら材料試験を実施し、キャスクへの適用性を確認した。

1) ボロン添加アルミニウム合金の材料特性試験結果の概要

キャスクへの適用性の確認と設計に使用する許容応力策定のため、材料試験を実施した。

・引張試験

ボロン添加アルミニウム合金のキャスクへの適用性の確認と設計に使用する許容応力を策定するため、引張試験を実施した。一般にキャスク使用時におけるバスケットの最高温度は 200 ~ 250 程度であることから、試験温度はバスケット温度を包絡する室温 ~ 300 とした。各温度における供試材は、材料製造時の誤差による化学成分の強度への影響を確認するため、母材であるアルミ合金 A6N01 の主要添加元素である Si, Mg と B4C の添加量を変化させた 12 チャージから採取した。また、通常の引張試験とは別に、実使用ではボロン添加アルミニウム合金が長期間使用高温環境下に保持されるため、高温環境下長期使用における材料強度の安定性を確認する観点で 250 及び 300 で 1000 時間及び 5000 時間、長期加熱保持した試験片による引張試験を行った。

引張試験の結果を Fig.4 に示す。図中の設計降伏点は 12 チャージ個々のバラツキから求めた信頼度 99% の下限値から設定した。また、図中は、各試験の平均値を記載した。図からも確認できるとおり、長期高温保持した場合でも、時効強化処理材と異なり、材料は安定した強度を長期にわたりて保持できることが確認された。また、A6N01 材の強度(室温 55MPa) [1]と比較すると、強度が向上していることが確認された。

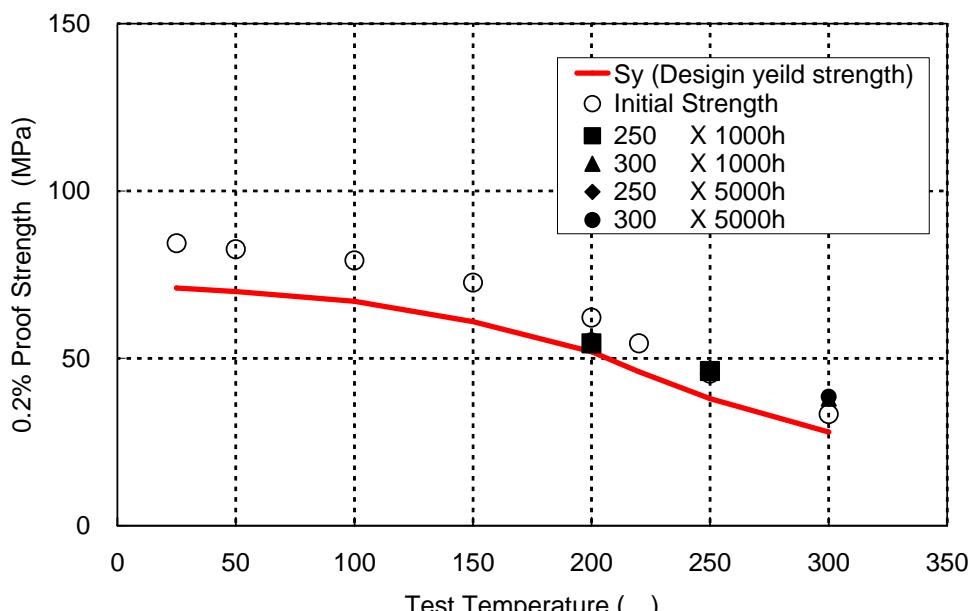


Fig.4 Strength of boronated aluminum

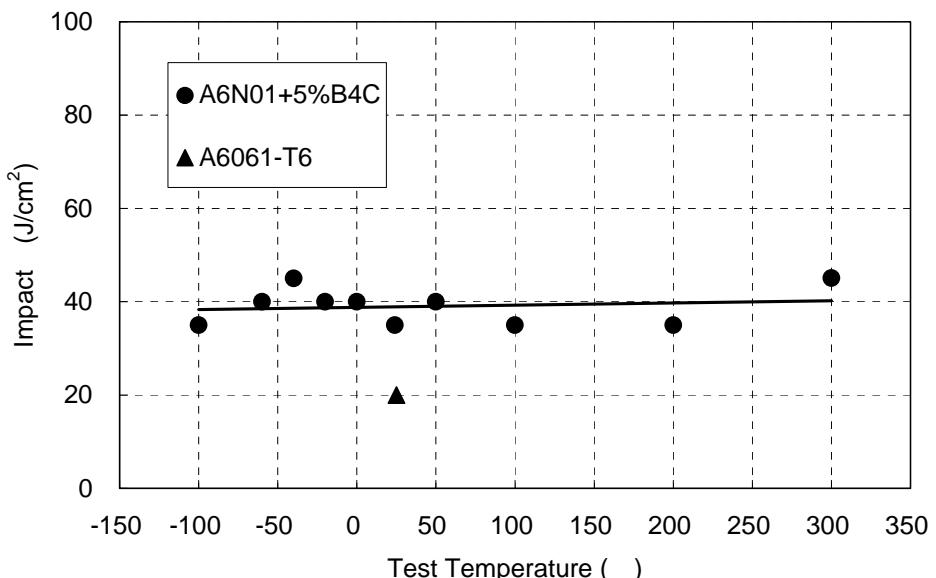


Fig.5 Result of Charpy impact test

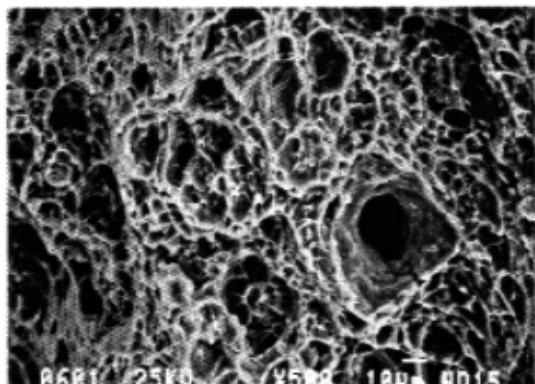


Fig.6 Micrograph of fracture surface of failed test piece for Charpy impact test

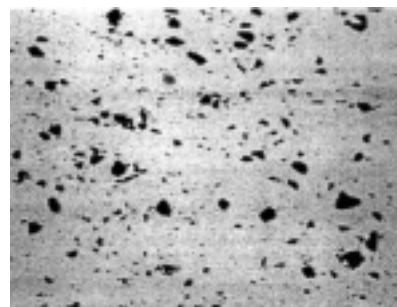


Fig.7 Microscopic metallic structure of boronated aluminum

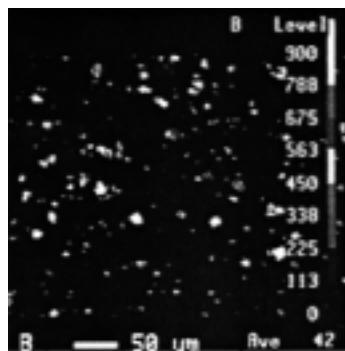


Fig.8 Microscopic distribution of boron in boronated aluminum

・シャルピー試験

材料のキャスクへの適用には、材料がキャスクにおいて使用される温度領域で脆性破壊しないことを確認する必要がある。材料が脆性破壊しないことを確かめるため、-100 ~ 300 においてシャルピー試験を実施し、吸収エネルギーと試験片の破面観察を行った。それらの結果を Fig.4,5 に示す。試験の結果、試験片の破面はすべて延性破面を示しており、材料が脆性破壊しないことを確認した。また、吸収エネルギーを断面積で除して求めた衝撃値は、40[J/cm²]程度を確保しており十分な韌性を有していることを確認した。

・ミクロ観察

ボロン添加アルミニウム合金に含まれるボロンが均一に分散していることを確認するため、ミクロ観察及びEPMA 観察を実施した。その観察結果の一例を Fig.7,8 に示す。試験片はいずれも均一な金属組織を呈しており、均一にボロンが分散していることを確認した。

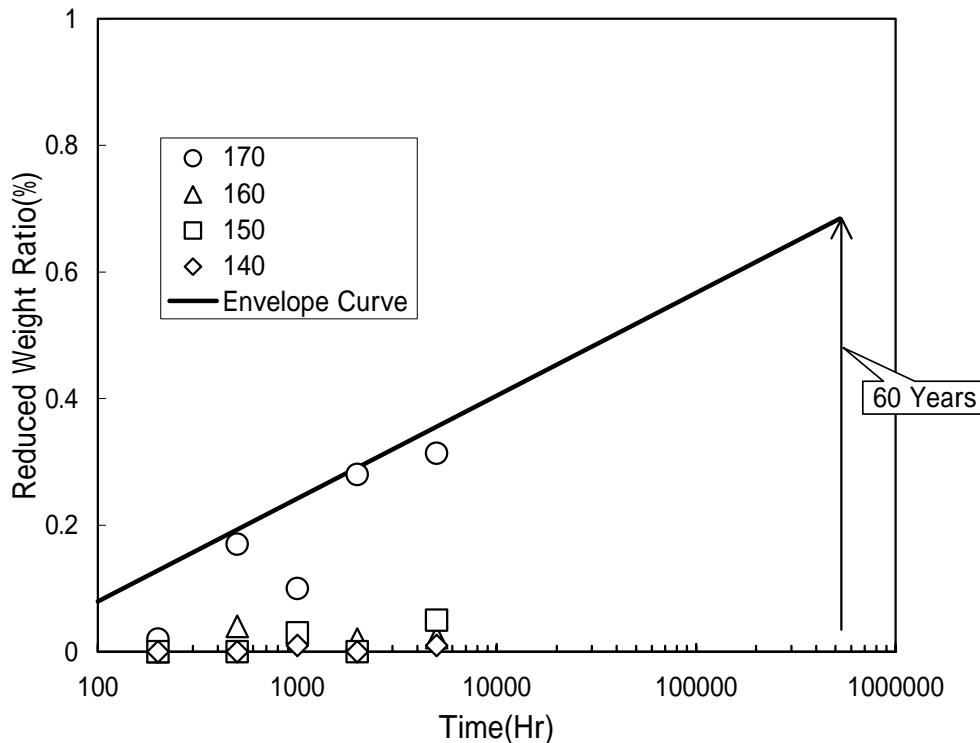
2) 中性子しゃへい材の確認試験

中性子しゃへい材のキャスクへの適用のため、長期加熱

・長期加熱試験

レジンの長期安定性確認として、絶縁材料の耐熱性評価手法に関する国際規格 (IEC Pub.216-1) 及びドイツのプラスチックに対する長期耐熱性試験に関する規格 (DIN 53446) に準拠し、最長 5,000 時間、レジン試験片を密閉容器で 140 ~ 170 の環境下で連続加熱し、水分減損に伴う重量減損を確認した。

結果を Fig.9 に示す。5000 時間後の 150 環境下でレジンの重量減損は 0.04wt%，170 においては 0.35wt%程度



Note: The envelope curve is estimated to envelope experimental data at a confidence coefficient of 99%.

Fig.9 Result of long time heating test for neutron shielding material

である。また、一般にレジンの重量減損は初期段階で多く生じ、アレニウス則によく一致する。本レジンについてもアレニウス則に一致する傾向があることから、これに基づく外挿評価を行うと60年後でも重量減損は1wt%以下である。

・耐火試験

輸送規則ではキャスク火災事故を想定したキャスクの安全性を要求しており、特別の試験条件では30分間800環境下に放置する耐火試験条件でもキャスクの安全性が保持される必要がある。耐火試験条件に対しMSFシリーズキャスクでは、レジンの50%が焼損されることを仮定し、この状態でも規則に要求されるしゃへい能力が十分満足されるようしゃへい設計が行われている。

そこで、試験用のレジンサンプルを製作し、試験炉で800環境に30分間保持する耐火実証試験を実施し、レジンの焼損状況を確認し、耐火試験後におけるレジンの残存量が十分であることを確認した。併せて、実際の火災事故におけるキャスクの安全性の観点から、レジンの自己消火性を確認した。結果の概要は以下の通りである。

自己消火性の確認

レジンサンプルは試験炉に設置後しばらくして着火、炎を噴いて燃焼する。しかし、炉から取り出すとまもなく鎮火することが認められ、レジン自体に自己消火性を持っていることを確認した。



Fig.10 Photograph of test piece after fire test

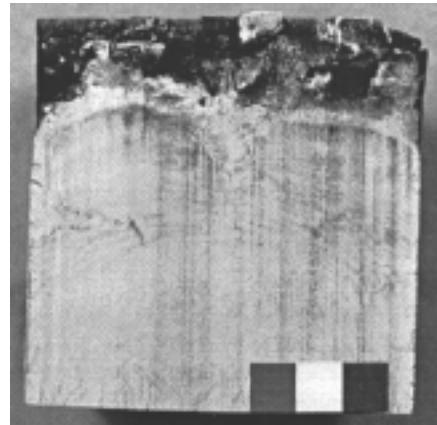
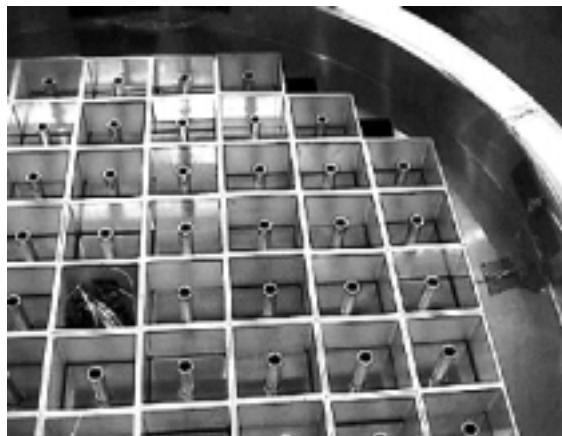


Fig.11 Photograph of cross section of test piece after fire test

Table2 Comparison of test piece weight before and after fire test

Sample	Before Fire Test (g)	After Fire Test (g)	Weight Reduction Ratio (wt %)	Note
A	619.7	485.6	21.6	Including Weight of Thermocouple
B	620.4	487.8	21.4	

**Fig.12 Slice model for heat dispersion test****Fig.14 1/2 scale model for 9m drop test**

焼損状況の確認

Fig.10,11 に耐火試験後のサンプル写真 ,Table2 に試験前後の重量変化を示す . レジンの焼損量は寸法上表面側の 15 ~ 20% 程度 , 重量の 20% 程度であり , キャスク設計上焼損量の基準値である 50% 以下であることを確認した .

3.2 機能確認実証試験

1) 伝熱試験 バスケット及び胴における伝熱性能の確認

と ABAQUS による解析の妥当性を確認するため実機スケールでのスライスモデル実験を実施した .(Fig.12) 結果を , Fig.13 に示す . 図より , ABAQUS による伝熱解析の結果は実機より保守側の解析となることを確認した .

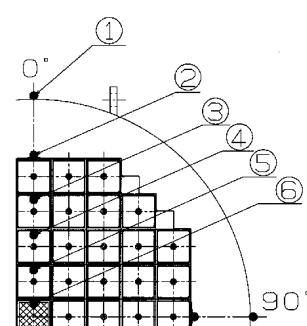
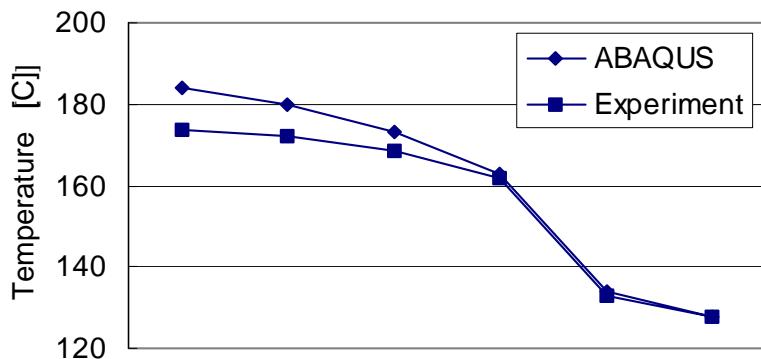
2) 密封性試験

金属ガスケットを採用した本キャスクの密封健全性確認と設計妥当性確認のため , 9m 落下試験による実証試験

Table3 Comparison of leak rate at gasket before and after 9m drop test

Drop Test	Number of Times	Position of Gasket	Leak Rate (Pa· m³ / s)	
			Before Drop Test	After Drop Test
Horizontal Drop	1 st	Primary lid	8.8×10^{-11}	8.2×10^{-11}
		Secondary lid	3.2×10^{-9}	1.9×10^{-8}
	2 nd	Primary lid	7.8×10^{-10}	7.0×10^{-10}
		Secondary lid	1.3×10^{-9}	5.6×10^{-10}
Vertical Drop	1 st	Primary lid	1.0×10^{-11}	1.5×10^{-10}
		Secondary lid	1.1×10^{-11}	2.6×10^{-8}

Note: Standard Leak Rate = 1×10^{-4} Pa· m³ / s

**Fig.13 Comparison between temperature form prediction by ABAQUS and experiment**

を実施した。供試体を Fig.14 に示す。実証試験は 1/2 スケールの実機を模擬したものとし、一次蓋、二次蓋にそれ

ぞれ金属ガスケットを取り付けて実証試験を行った。落下試験前後に測定した漏洩率の測定結果を Table3 に示す。一次蓋、二次蓋とも多少の変動があるものの設計上必要とされる漏洩率 ($1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$) と比較して落下試験の前後で多少変動するものの漏洩率に有意な変化はなく十分な密封性能を確保できる構造であることが確認できた。

4まとめ

MSF シリーズキャスクは、

- 1) 新構造（バスケット構造、本体構造、金属ガスケット）
- 2) 新材料（ボロン添加アルミニウム合金、中性子しゃへい材）

を採用した。このことにより、特に長期使用における信頼性向上と、高収納化、取扱い性の向上を実現した。さらに、これらの新規技術は、実証試験により、その妥当性を確認した。

今後、これらの新技術を採用した MSF シリーズキャスクを顧客に対して提案していく計画である。

参考文献

- [1] Harold J. Hucek, Structural Alloys Handbook, Metals and Ceramics Information Center, p.67, (1984)