

(解説)

当社におけるキャスク開発の現状

Status of Cask Development at Kobe Steel



谷内廣明*(工博)
Dr. Hiroaki Taniuchi



吉村啓介*
Keisuke Yoshimura



赤松博史*
Hiroshi Akamatsu

Kobe Steel has been involved in the design, safety analysis and fabrication of transport and/or storage casks for radioactive materials for more than 20 years. Transport casks were primarily developed early on, however, now production has largely shifted to storage casks. To make the casks as safe as possible, without huge added expense, the advanced types of casks have been and will be developed and new materials such as high performance neutron shields and neutron absorbing materials are being increasingly developed and used.

まえばき = キャスクとは、原子炉から取出した使用済燃料を輸送あるいは貯蔵するための容器であり、用途により色々な構造がある。当社のキャスクへの取組みは、1980年初頭に国内の使用済燃料をフランスの再処理工場へ輸送するTN型輸送キャスクの製造から始まった。その後、これまでの二十数年間に、研究炉の使用済燃料を輸送する小型キャスクから商業炉の使用済燃料を輸送・貯蔵する大型キャスクまで、多種多様の金属製キャスクの開発、設計、製造に携わり、表1に示すように150基以上のキャスクを製造しており、世界的に見ても有数の製造実績を誇っている。

ここではこれまでの実績を振り返るとともに、最近の当社のキャスクの開発状況、特に今後需要の拡大が見込まれている貯蔵キャスクを中心に説明する。

1. 輸送キャスク

1980年代にTN型キャスク、研究用原子炉燃料用キャスクの製造を実施しキャスク設計のノウハウを確立し、その後、NFT型キャスク設計の共同開発へと進んでいった。今後は、放射性廃棄物関連の輸送キャスクの需要が見込まれている。

表1 当社のキャスク製造実績
Table 1 Casks fabricated by Kobe Steel

Delivery year	Type of cask	No. of casks
1981-2003	TN type transport cask	68
1981	JRC-80Y-20T transport cask	2
1985-2003	TN type transport/storage cask	61
1997-2000	NFT type transport cask	19
1988-2001	Cask for radioactive waste	25
1988-1993	Others	12
Total		187

1.1 TN型キャスクの製造

当社が最初に製造したのは、国内発電所で発生する使用済燃料をフランス COGEMA の再処理工場まで運ぶために、COGEMA LOGISTICS 社(以下 ACL 社と呼ぶ。当時は TRANSNUCLEAIRE 社と呼ばれていたが、現在は COGEMA の関連会社となり、2002年に社名も現在の名称に変更された)が設計した TN12 型と呼ばれる PWR 燃料を 12 体収納することのできる鍛造炭素鋼製乾式輸送キャスク(輸送時にはキャスク内部を乾燥状態に保持するタイプであり貯蔵キャスクと同等の構造)である。写真1に外観を示すが、直径約 2.5m、長さ約 6.5m、重量約 115 トンの大きさである。

このキャスクを製造するにあたり、日本のユーザである電力会社は日本当局の認可(設計承認)をあらかじめ取得する必要があるが、このためにこのキャスクが安全であることを示すための安全解析(構造、熱、密封、遮へい、臨界の五つの解析)を実施する必要があり、当社はこの安全解析書作成業務も同時に初めて経験することとなった。フランス当局向けの安全解析書をベースとして、国内の技術基準に則った解析方法などを確立して安全解析書を完成させたが、このときの苦労が当社のキャスク設計技術の実力を向上させる上で大きく寄与している。この経験を通じて、キャスクの安全機能である除熱機能(キャスクに収納する使用済燃料などの発熱を適切にキャスク外部に逃がす機能)、密封機能(放射性物質の閉じ込め機能)、遮へい機能(使用済燃料などの放射線を適切に遮へいする機能)、臨界防止機能(使用済燃料などが臨界状態になることを防ぐ機能)及びこれらの機能をいかなる運用状態においても維持するための構造強度設計の設計技術を蓄積することができた。

その後、TN12 型の改良型である TN12A (PWR 燃料 12 体収納)、TN12B (BWR 燃料 32 体収納)、少し小型

*エンジニアリングカンパニー エネルギー本部 高砂機器工場



写真1 TN12型輸送容器
Photo 1 TN12 type transport cask

となるTN17型（BWR燃料17体収納）の安全解析，製造を数年の間に立て続けに実施していった。

1.2 研究用原子炉燃料用キャスク

TN型輸送容器の製造と平行して，当社では日本原子力研究所の研究用原子炉燃料を輸送するキャスクの設計，製造業務を実施した。このキャスクの外観を写真2に示す。JRC-80Y-20T型と呼ばれ，重量約20トンの小型キャスクではあるが，バスケットを交換することにより多種類の形状の燃料が収納でき，規則に定められた9m落下試験時の落下エネルギー吸収のためにキャスク本体に取付けた放熱フィンを利用するなど，色々なアイデアを取入れている。この設計が当社にとっては新型キャスクの最初の設計であったが，国内では数少ないBU型核分裂性輸送物としての認可を受けている。

1.3 NFT型キャスク¹⁾

青森県六ヶ所村に建設中の国内再処理工場へ国内の各発電所から使用済燃料を輸送するためのキャスクの開発は，電力会社の指導のもと，原燃輸送隊の下で国内キャスクメーカー4社が共同で設計を実施した。当社はこの設計に参画し，主に鍛造炭素鋼タイプであるBWR燃料用キャスクの設計に貢献した。NFT型キャスクは6種類設計されており，写真3に代表的なNFT-38B型キャスクの外観を示す（NFT型キャスクは湿式キャスクであり，輸送時にもキャスク内部に水を保持している）。

以上，主要な使用済燃料輸送キャスクについて述べた



写真2 JRC-80Y-20T型輸送容器
Photo 2 JRC-80Y-20T type transport cask



写真3 NFT型輸送容器
Photo 3 NFT type transport cask

が，当社はこれ以外にも放射性廃棄物，中性子源などを輸送するキャスクの設計，製造も実施している。また，今後は発電所内に貯蔵されている放射性廃棄物や原子炉の解体時に発生する放射性廃棄物を輸送するためのキャスクの需要が生じてくると考えている。

2. 貯蔵キャスク

当社は，使用済燃料の貯蔵キャスクに関し，早くからその安全性や経済性などのメリットに注目し，輸送貯蔵兼用の金属キャスクTN24の開発を開始した。現在，世界的に輸送貯蔵兼用キャスクの需要が拡大しており，このTN24をベースにTK69などの新型キャスクの開発を進めている。

2.1 原型TN24

当社とACL社は，TN型輸送キャスクの製造に際しお互いの能力を高く評価して，1983年に輸送貯蔵兼用キャスクの共同開発に着手した。輸送実績の豊富なTN型乾式輸送キャスクをベースに貯蔵の特性を考慮した基本設計を行い，2/5スケールモデルを用いた9m落下試験（写真4参照）などを含めた2年間のR&D実施後，1985年には日本最初の輸送貯蔵兼用キャスクとなる鍛造炭素鋼製キャスクTN24の詳細設計を完了した。TN24は，



写真4 TN24 2/5スケールモデル落下試験
Photo 4 TN24 2/5 scale model drop test

PWR 燃料を 24 体収納できることからこの名前を付けたものである。当社は、図 1 に示すこのプロトタイプキャスクを 1 基製造し、米国 Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) での使用済燃料貯蔵の実証試験用として納入した。INEEL では、現在もこのキャスクを用いて試験が継続されているが、これまで実施した試験などにより数々の貴重なデータが取得され、公開されている^{2),3)}。

2.2 国内初の貯蔵キャスク TN24

1990 年代に入り、TN24 は国内での貯蔵キャスクの候補にあげられ、当社は、当時の通商産業省の乾式キャスク貯蔵実用化にあたっての法令、技術基準の整備に全面的に協力した。その結果、TN24 は国内で最初の貯蔵キャスクとしての認可を受け、東京電力(株)福島第一原子力発電所において、1995 年より 9 基の TN24 を用いた使用済燃料の貯蔵が実施されている。写真 5 にその外観を示す。また、主要な仕様を表 2 に示す。

一方海外においても、ACL 社は当社と共同で開発した TN24 をベースに、ヨーロッパにおいて TN24 シリーズと



写真 5 TN24 型輸送・貯蔵容器
Photo 5 TN24 type transport/storage cask

して TN24D、TN24XL など多数のラインアップをそろえ、米国でも ACL 社の子会社である TRANSNUCLEAR 社 (TNY 社) が TN-32、TN-40、TN-68 などをつくらせている。なお、TN-32、TN-40 は貯蔵専用キャスクとしての設計である。

2.3 TK 型キャスク

TN24 のプロジェクト完了後、貯蔵の経済性の重要度がますます高くなり、1997 年に当社と ACL 社は、再び共同で、TN24 をベースとしながら、これまで培ってきた多くの乾式キャスクの設計、製造、運用の実績を用いて、さらに進んだ鍛造炭素鋼製輸送貯蔵兼用キャスクとして TK 型キャスクの開発を実施した。図 2 は、BWR 燃料用に開発した TK-69 の構造である。このキャスクには BWR 燃料を 69 体収納可能である。TK 型キャスクの主要な仕様を表 2 に示している。なお、TK-69 は既に輸送の認可を取得済みである。

TK-69 の設計思想は、安全性をさらに高め、同時に経済性を向上させることである。つまり収納体数を高めるとともに、安全性に関しては日本及びヨーロッパの安全基準を同時に満たすことができる設計とすることにより、日本及びヨーロッパでの輸送を可能とした。ヨーロッパでの輸送が可能となることにより、将来、貯蔵後ヨーロッパの再処理工場に送るというオプションが可能となり、顧客にとって使用済燃料管理の柔軟性が増える。

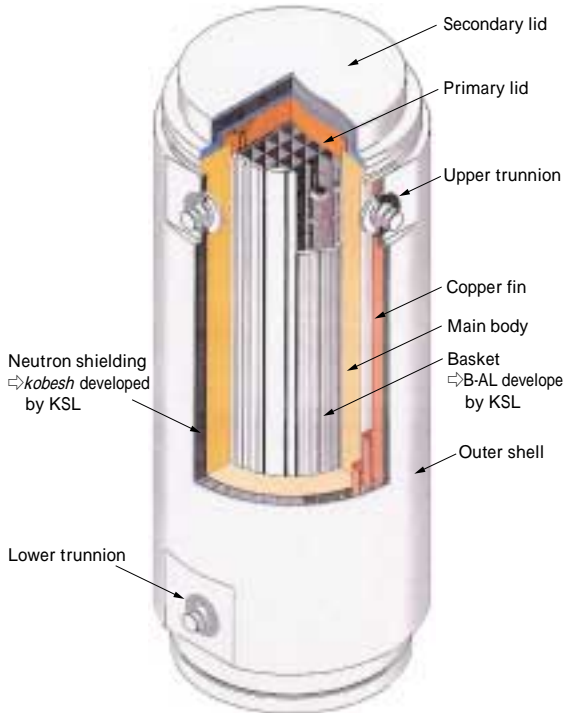


図 1 TN24 型輸送・貯蔵容器の構成
Fig. 1 Structure of TN24 type transport/storage cask

表 2 当社のキャスクの主要な仕様

Table 2 Major characteristics of casks designed by Kobe Steel

		TN24		TK		KATS		Concrete	
		Prototype	Domestic type	TK-PWR	TK-69	KATS-P24	KATS-B69	PWR type	BWR type
Fuel type		PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR	PWR	BWR
Average burn-up (Mwd/tU)		35 000	33 000	44 000	33 000	44 000	33 000	50 000	45 000
Cooling time (years)		5	4	10	10	10	10	10	10
Total weight (ton)	Transport	94	-	132	132	131	132	-	-
	Storage	88	115	120	120	119	120	168	165
Length (m)	Axial (Main body)	5.1	5.6	5.1	5.4	5.2	5.3	6.2	6.2
	Diameter (Main body)	2.3	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6	3.4	3.4
No. of loaded fuels		24	52	More than 26	69	24	69	More than 21	More than 52
Total heat (kW)		24	28	25	19	21	19	20	20
Note			Licensed for storage	Under development				Under development	

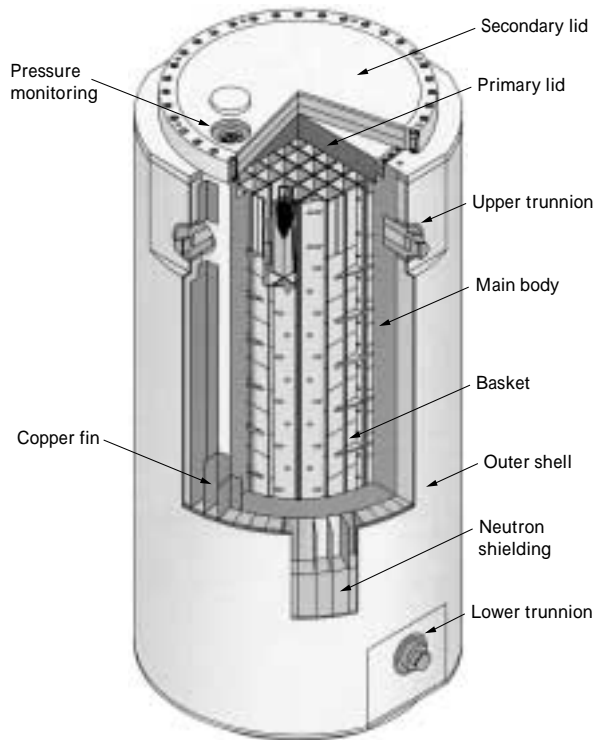


図2 TK69型輸送貯蔵容器の構成
Fig. 2 Structure of TK69 type transport/storage cask

このような設計が可能となった一つの理由は、後で述べる高性能中性子遮へい体 *kobesh* やバスケット材のボロン添加アルミニウム合金の開発により、より安全性の高い材料の使用が可能になったからである。今後は、それぞれの顧客の要望に応じて、世界的にTKシリーズとして個々の設計を実施していく予定である。

3. 新型キャスクの開発

キャスク構造としては、TN型を代表とする鍛造炭素鋼のほかにガンマ線遮へい能力が高い鉛を使用したサンドイッチタイプ、短期間に製造できる球状黒鉛鋳鉄タイプ、経済性を追及したコンクリートタイプなどがある。当社では、これら全てのタイプについてその特徴を把握し設計検討を実施してきたが、以下の2種類のタイプについては今後も有力とみて検討を継続している。

3.1 KATSタイプ(鉛ブロックタイプ)

1990年代の初頭にキャスクのリサイクル性を考慮し、かつコストの安いキャスクとしてKATSを開発した。KATSは図3に示すように、主要なガンマ線遮へい体を鉛ブロック、中性子遮へい体をレジブロックとして、大量生産型の部品を使用することにより、製造工程の短縮化、キャスク解体時の材料の再利用を容易にできるようにしたものである。上で述べた鉛を鋼板でサンドイッチするタイプでは、鉛と鋼板との間の熱伝導性を確保するため特殊な表面処理を施す必要があるが、KATSでは鉛ブロックに熱伝導を期待しないため、このような特殊処理の必要がなく、簡単に施工できる点が大きな特徴となっている。今後、リサイクルの要望が高まった場合には有力な構造になる。

3.2 密封型コンクリートキャスク

以上はいずれも金属キャスクであるが、コンクリート

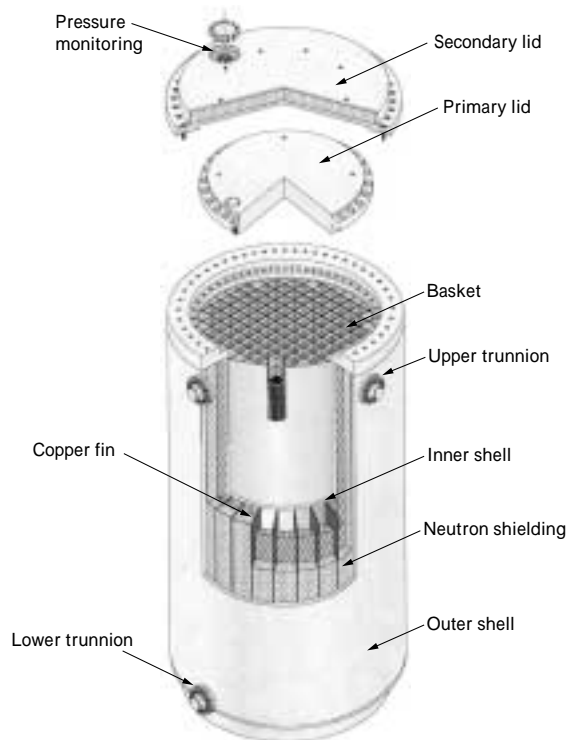


図3 KATS型輸送・貯蔵容器の構成
Fig. 3 Structure of KATS type transport/storage cask

キャスクについても新型構造を検討し、現在、密封型コンクリートキャスクの開発を推進している。設計思想としては、金属キャスクと同等の安全性を確保しながら経済性をさらに追及したキャスクの実現である。この目的のために、当社は、コンクリートに深い知見を持つ大成建設㈱と共同で新型の耐熱性コンクリートの開発に数年前より着手し、実用性の高い材料の開発に成功した。このコンクリートは、キャスク内部で想定される150程度の環境下においても中性子遮へいに有効な水分を放出することがなく、強度も維持できる材料であるため、金属キャスクと同様の本体構造が可能である。従来のコンクリートキャスクは、コンクリートの温度を低く保つ必要があり、構造上、密封監視が不可能となり、キャスタ材の腐食が懸念されるなどの問題があったが、この新規材料を使用することにより、これらの問題を解決できる。

現在、材料特性の最終確認を実施するとともに、この材料を用いた密封型コンクリートキャスクの基本設計を完了した。図4に構造を示す。主要な仕様を表2に示している。ここに示したのは貯蔵専用キャスクの設計であるが、将来的には輸送貯蔵兼用キャスクの設計を目標としている。また材料開発の今後の目標としては、収納効率を向上させるためにより密度の高いコンクリートを開発していくことである。

4. キャスク材料に関する開発

当社は、これまで20年間以上にわたり、常によりよいキャスク設計を行うために多くの研究開発を進めてきた。特に原子力特有の遮へい安全、臨界安全を十分確保するための材料開発に注力しており、これまで、耐熱性が高く中性子遮へい性能にも優れた高性能中性子遮へい

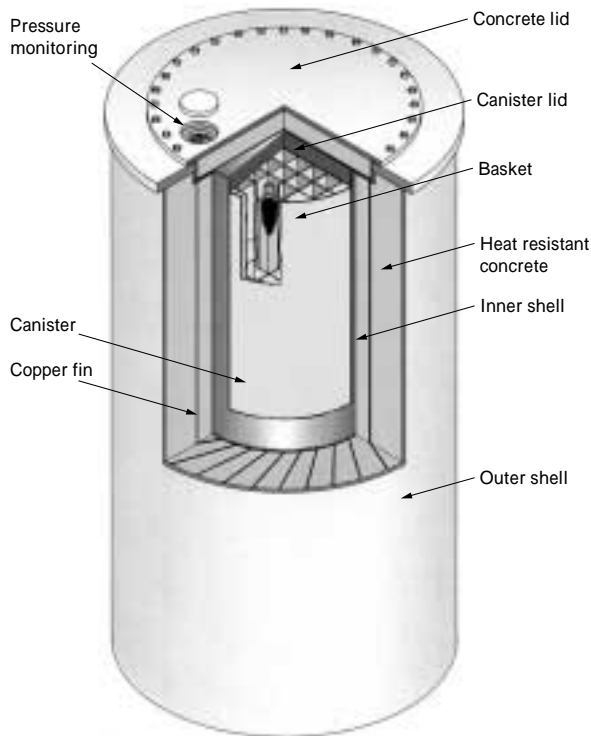


図4 密封型コンクリートキャスクの構成
Fig. 4 Structure of seal type concrete cask

材として *kobesh* シリーズを開発し、臨界安全に関しては、バスケット材として使用される濃縮ボロン添加アルミニウム合金の製造方法を確立してきた。これらの材料に対しては、長期貯蔵後もその性能が確保されていることを確認するために、実際の使用温度よりも高い温度に長期間保持する加速試験を実施して、その安全性を評価している。以下に各材料の特徴を簡単に述べる。

4.1 高性能中性子遮へい体 *kobesh*

当社では、従来材に対し中性子遮へい性能を高め、かつ十分な耐熱性を持つ中性子遮へい材の開発を貯蔵キャスクの開発と同時に着手し、それぞれ特色のある材料を開発することができた。

これまで開発してきた *kobesh* としては、シリコンゴム(SR)タイプ、エチレン・プロピレンゴム(EPR)タイプ、水素化チタン(TH)タイプ、ポリプロピレン(PP)タイプの4種類がある。SRは国内向けのTN24型キャスクで使用するとともに海外への販売も実施しているもので、耐熱性が特に高い。EPRについては、TKタイプなどの新型キャスクでの使用を考えている材料で

あり、耐熱性はSRよりも少し低いが中性子遮へい性能が高い。THタイプは、最も遮へい性能が高く耐熱性も非常に高いため究極の遮へい材であるといえるが、残念ながら製造コストが現状の製造方法では非常に高く、キャスクへの採用はまだ行われていない。

4.2 濃縮ボロン添加アルミニウム合金

国内向けTN24型キャスクの設計に際し濃縮ボロン添加アルミニウム合金の将来性を確信したため、1995年より本製品の自社製造技術の開発に着手した。

材料的には4~5%程度までボロンを添加することが可能であるが、構造強度部材として用いるためには、ボロン含有量を1%程度に押さえる必要がある。当社では、1%ボロン添加アルミニウム合金として、まずA6061材について実用化し、現在、A3004材をベースとした材料について実用化を図っている。

4.3 その他

上記以外にも、本体の密封上重要な金属ガスケットの長期健全性の評価、各種緩衝材料の特性評価などの試験も実施し、より安全性が高く、経済性に優れたキャスクの設計を追及するために新材料の開発を継続している。

むすび= 当社は、キャスクに関しこれまでACLとの共同開発や独自開発を進めてきた。1984年にACLと共同で子会社としてトランスニュークリア(株)(TNT)を東京に設立、2002年に国内を含むアジア地域におけるキャスクの基本設計、開発から販売まで中心的な役割を持たせることに合意し、現在、TNTは当社とACLを代表することになった。当社はTNTを支援しながら、今後ともキャスクの開発・製造を通じて原子力産業の発展に尽くしていくつもりである。

参考文献

- 1) S. Shimura : RAMTRANS, Vol.8, Nos3-4 (1997) p.257.
- 2) J. M. Creer et al. : Electric Power Research Institute, EPRI NP-5128 (1987) .
- 3) M. A. McKinnon et al. : Electric Power Research Institute, EPRI NP-6191 (1989) .