

(解説)

使用済燃料輸送貯蔵容器の現状と今後の展望

Transport and Storage Casks Development



赤松博史*
Hiroshi Akamatsu



谷内廣明*(工博)
Dr. Hiroaki Taniuchi



進 俊彦*
Toshihiko Shin



吉村啓介*
Keisuke Yoshimura



下条 純*
Jun Shimojo



山田 斉**
Hitoshi Yamada

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 these casks as safe as possible, without adding a huge expense, advanced types have been developed with new materials. The materials most commonly used or being developed are high performance neutron shields and neutron absorbing materials.

まえばき = エネルギー資源に乏しい我国にとって、国の活動の根幹を支えるエネルギーを安定的に確保していくことは、重要な課題である。特に、石油などの化石燃料のほとんどを輸入に頼らざるを得ず、将来有望視されている風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの代替供給能力が発展途上であることを考えると、原子力発電は我国にとって欠くことのできないものと考えられる。また、原子力発電は火力発電に比べて炭酸ガスなどの発生が少ないという長所を有しており、地球温暖化や酸性雨などの環境問題対策としても有効である。

原子力発電は現在、我国の発電量の約3分の1をまかになっているが、さらにウラン資源の有効利用をはかるために、我国では原子燃料サイクル事業の確立がなされる計画である。当社は、この原子燃料サイクルのフロントエンドからバックエンドに至る輪を形成するために不可欠な、使用済燃料輸送容器・貯蔵容器（以下、キャスクと呼ぶ）の開発・設計・製造を行ってきた。本稿では、その経緯と将来展望について述べる。

1. キャスク分野における当社の歩み

キャスクとは、原子炉から取出した使用済燃料やそれを再処理した後に出る放射性廃棄物を、輸送あるいは貯蔵するための容器である。当社のキャスクへの取り組みは、1970年代後半に原子力先進国であるフランスのCOGEMA LOGISTICS社（以下ACL社と呼ぶ。当時はTRANSNUCLEAIRE社と呼ばれていた）が開発したTN12型キャスクの、国内の安全解析、国内許認可取得助勢および製造を受注したことから始まった。

当時我国は、原子力発電所から出る使用済燃料の再処理を、フランスおよびイギリスの再処理施設で実施する契約を結んでおり、使用済燃料を我国の原子力発電所からヨーロッパに運ぶ必要があった。このTN12型キャス

クは、フランスへの輸送に用いられたものであり、1981年に1号基を完成しフランスに納入した。このキャスクの製造に始まり、その後のTN型キャスクの製造と国内許認可の取得作業助勢業務、輸送貯蔵キャスクの共同開発、共同出資のトランスニュークリア㈱の設立などを経て現在に至っている。

1990年代に入り、青森県下北に再処理施設の建設が進み、これに伴って国内発電所の使用済燃料を国内再処理施設に運ぶという国内輸送が必要となり、国産技術によるNFT型輸送キャスクの開発が行われた。この開発は、原燃輸送㈱を実施主体として、国内のキャスクメーカー4社が共同で実施したものであるが、当社はTN型キャスクの経験を生かし、大型の鍛造タイプの開発を担当した。

また、国内の原子力発電所の使用済燃料貯蔵能力の増強対策がいくつかの発電所で実施されており、当社は、東京電力㈱福島第一原子力発電所で採用された我国初の使用済燃料乾式貯蔵キャスクを開発し、乾式キャスク貯蔵が実用化された。

TN12型キャスクの製造に始まり、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200基以上のキャスクを製造し

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
1985-2004	TN type transport/storage cask	79
1997-2000	NFT type transport cask	19
1988-2001	Cask for radioactive waste	25
1988-1993	Others	12
Total		205

*機械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 **機械エンジニアリングカンパニー プロジェクト本部 技術部

ており、世界的にも有数の製造実績を誇っている。

2. キャスク技術開発

キャスクに収納される使用済燃料や放射性廃棄物は、キャスク1基当たりで最大数十kW程度の発熱があり、相当量のガンマ線や中性子を放出する。このためキャスクには、熱を逃がしキャスクの構成部材や使用済燃料などの温度を適切に下げするための「除熱機能」、放射性物質を閉じ込めるための「密封機能」、ガンマ線や中性子を遮へいし、キャスク外部の線量率を下げて放射線被曝を防止するための「遮へい機能」、および使用済燃料に若干残っているウラン²³⁵の核分裂による臨界を防止するための「臨界防止機能」の四つの安全機能と、落下事故や火災事故などの設計事象においてこれらの安全機能を維持するための構造強度が要求される。

使用済燃料は、図1に示すようにバスケットと呼ばれる格子状の構造物に収納される。バスケットは、使用済燃料から出る中性子を吸収し使用済燃料が原子炉のように臨界になるのを防止するため、中性子吸収断面積が大きいボロンを添加したアルミニウム合金やステンレス鋼で構成される。バスケットは、キャスク本体内部に配置される。キャスク本体は放射性物質を閉じ込めて密封し、ガンマ線を遮へいするため、厚肉の鍛造炭素鋼、ステンレス鋼などの密封容器で耐圧部が構成され、その外側に中性子を遮へいするための中性子遮へい材が配置される。中性子遮へい材配置部には、使用済燃料から出る熱を外側に逃がす伝熱フィンが取り付けられている。

2.1 TN型輸送キャスク

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社の再処理工場まで運ぶためにACL社が開発した、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である。直径約2.5m、長さ約6.5m、重量約115トンの大きさであり、写真1にその外観を示す。

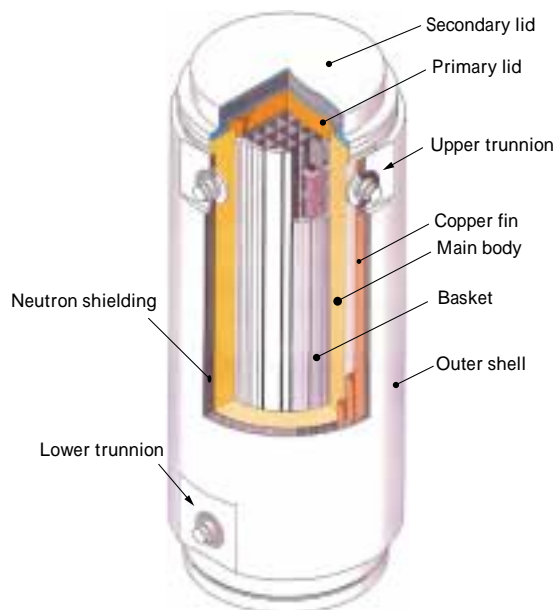


図1 TN24型輸送・貯蔵容器の構成
Fig. 1 Structure of TN24 type transport/storage cask



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

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の監督官庁の認可（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。フランス当局へ提出された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したが、この時の苦労が当社のキャスク設計技術力の向上に大きく寄与している。

本キャスクのバスケットは、未臨界を維持するためにボロンカーバイド銅焼結板やワイヤメッシュをアルミニウム鋳造で所定の位置に鋳込んで成型する特殊構造であり、当社名古屋工場において製造技術を開発した。これにより、キャスク本体とバスケット両者を製造できる世界初のメーカーとなった。

その後、TN12型の改良型であるTN12A型（PWR燃料12体収納）、TN12B型（BWR燃料32体収納）、少し小型となるTN17型（BWR燃料17体収納）の安全解析および製造を数年間で立続けに実施した。

2.2 NFT型輸送キャスク¹⁾

青森県下北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、国内電力各社の指導のもと、原燃輸送㈱からの委託で、国内キャスクメーカー4社が共同で設計を実施した。当社はこの開発に参画し、主に鍛造炭素鋼タイプであるBWR燃料用キャスクの設計を担当した。NFT型キャスクは6種類設



写真2 NFT型輸送容器
Photo 2 NFT type transport cask

計されており、写真2に代表的なNFT38B型キャスクの外観を示す。

2.3 原型TN24型貯蔵キャスク

当社は使用済燃料の貯蔵キャスクに関して、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。

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落下試験などを含めた2年間のR&Dを実施後、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、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に示すプロトタイプキャスクを1基製造し、米国Idaho National Engineering Laboratory (INEL、現在はINEEL: Idaho National Engineering and Environment Laboratory)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⁾。

2.4 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、法令および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、東京電力福島第一原子



写真3 TN24型輸送・貯蔵容器
Photo 3 TN24 type transport/storage cask

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開始され、現在に至っている。写真3にその外観を示す。

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シリーズとしてTN24D、TN24XLなど多数をラインアップし、米国でもACL社の子会社であるTRANSNUCLEAR社(TNY社)がTN32、TN40、TN68などをそろえている。なお、TN40は貯蔵専用キャスクとしての設計である。

2.5 新型貯蔵キャスク

キャスク構造としては、TN型を代表とする鍛造炭素鋼タイプのほかに、ガンマ線遮蔽性能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て、以下の3種類のタイプが今後も有力とみて、技術開発を継続している。以下にこれら新型キャスクについて述べる。また表2にこれらの主要な仕様を示す。

1) TK型輸送貯蔵兼用キャスク

TN24のプロジェクト完了後、貯蔵における経済性の重要度がますます高くなり、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のTK型キャスクの開発を1997年実施した。図2はPWR燃料用に開発したTK型キャスクの構造である。

TK型キャスクの設計思想は、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およ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、日本およ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、顧客にとっては使用済燃料管理の柔軟性が高くなることとなる。

2) KATS型輸送貯蔵兼用キャスク

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型キャスクを開発した。KATS型キャスクは図3に示すように、主

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		HYCOM®		
	Prototype	Domestic type	TK-PWR	TK69	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/Storage	94	132	132	131	132	-	-	
		88	115	120	120	119	120	156	160
Length (m)	Axial (Main body)	5.1	5.6	5.1	5.4	5.2	5.3	5.7	6.2
	Diameter (Main body)	2.3	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6	3.2	3.3
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		

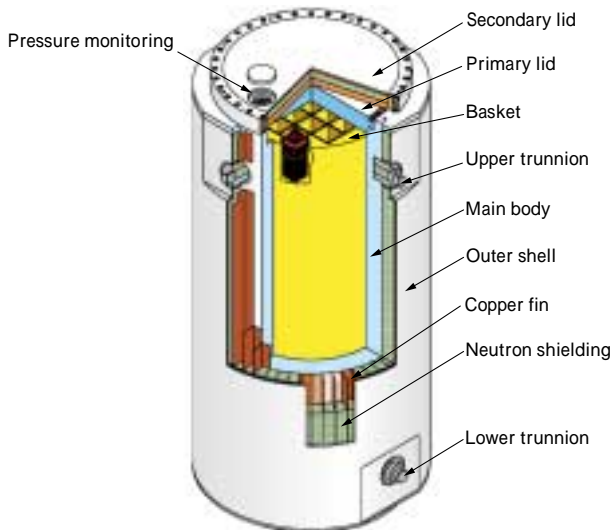


図2 TK型輸送貯蔵容器の構成
Fig. 2 Structure of TK type transport/storage cask

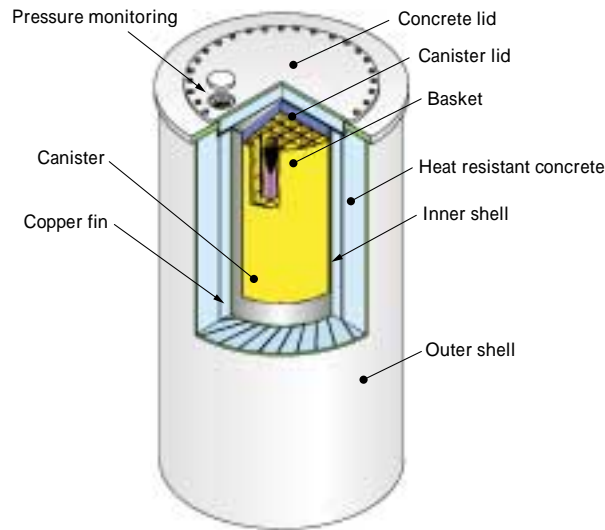


図4 ハイブリッドキャスク HYCOM®の構成
Fig. 4 Structure of hybrid of concrete and metal cask

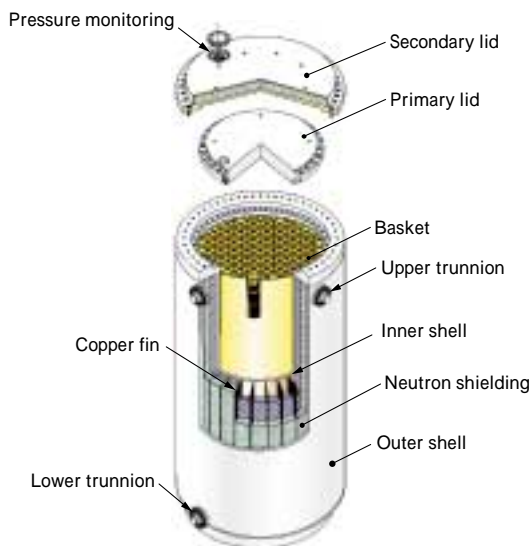


図3 KATS型輸送・貯蔵容器の構成
Fig. 3 Structure of KATS type transport/storage cask

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。先に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と，貯蔵終了後の廃棄時に分解・分別が容易であ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) ハイブリッドキャスク HYCOM®

上記の2タイプのキャスクはいずれも金属キャスクであるが，コンクリート系材料を使用した新構造のハイブリッドキャスク HYCOM® (HYbrid of COncrete and Metal) の開発を進めている。このような新しい構造を実現するために，当社はコンクリートに深い知見を持つ大成建設(株)，トランスニュークリア社と共同で，高耐熱性コンク

リート系材料 CALSHIELD®を開発した。従来のコンクリート材料は，含有水のほとんどを100℃で蒸発する自由水の形で保有しているため，使用温度が100℃未満に制限される。そのため，従来型コンクリートキャスクでは本体に除熱のための吸排気口が必要不可欠であり，密封監視が不可能であること，放射線のストリーミング，キャニスタ材の腐食が懸念されるなどの問題があった。一方，CALSHIELD®は200℃以上の高温でも中性子遮へいに有効な水素含有量を確保することができることから，密閉構造のキャスクが可能となり，従来型コンクリートキャスクの問題点を解決することができた。

現在，この材料を用いたHYCOM®の基本設計を完了した。図4に構造を示す。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についても検討を進める予定である。

3. 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，よりよいキャスク設計を行うために多くの研究開発を常時進めてきた。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ボロン添加ステンレス鋼と，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。また，高耐熱性コンクリート系材料 CALSHIELD®の開発にも成功した。これらの材料に対しては，長期貯蔵後で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。

3.1 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(TiH)タイプ、ポリプロピレン(PP)タイプの4種類がある。SRタイプは、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タイプは、新型キャスクへの適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く、経済性にも優れている。TiH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。

3.2 ボロン添加ステンレス鋼

未臨界性能を保つためにキャスク用バスケットや稱密ラックに用いられるボロン添加ステンレス鋼は、ボロンを均一に分布させることが困難であり、また圧延性が悪いため、特殊な製造技術が要求され、世界でも数社しか実績がなく高価であった。当社はTN17型輸送容器の受注をめざす中、当時の中央研究所、特殊合金本部、化工機工場が協力して、本材料の製造技術開発に国内で初めて1983年に成功した。開発された技術により製造されたボロン添加ステンレス鋼板は、受注したTN型輸送容器十数基のバスケットに使用された。

3.3 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、1995年より本製品の自社製造技術の開発に着手した。

冶金的には4%程度までボロンを添加することが可能であるが、靱性が低下するため、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系材料を実用化し、現在、ほかのアルミ合金材料について実用化を検討している。

3.4 高耐熱性コンクリート系材料 CALSHIELD[®]

本材料の開発目標は、従来型コンクリートキャスクで必要不可欠であった吸排気口をなくすために、高温環境でも遮へい性能の劣化が生じない材料を開発することである。このような材料を実現させるために、水酸化カルシウムを添加して、その結晶水で水分を保持させることにより、高温環境下でも中性子遮へいに必要な水素量を、普通コンクリートと比較して2~3倍に高めることに成功した。一方、キャスクの遮へい材としては、ガンマ線に対する遮へい性能も要求される。そのため、金属材料(鉄粉および鉄繊維)を添加することで従来の普通コンクリートと同等以上の密度を維持することで、十分なガンマ線遮へい性能の確保も可能にした。本材料を写真4に示す。

本材料には骨材および鉄筋が使用されないため、従来の普通コンクリートと比較して均質な遮へい材料であり、かつ原材料全てが工業製品であることから、品質管理においても優れた材料である。また、一般的に使用されている中性子遮へい材は有機物を含んでいるが、本材料は無機材料で構成されているため、長期間使用中にも



写真4 耐熱性コンクリートの切断サンプル
Photo 4 Cut sample of heat resistant concrete

放射線劣化を受け難い。更に、鉄繊維を添加することで、コンクリートの熱膨張による耐ひび割れ性にも優れている。

3.5 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。

4. キャスク関連技術開発

当社では、キャスクの関連技術として、キャスクを貯蔵する施設やキャスクを長期間安全に使用するために不可欠なメンテナンスを行うキャスク保守施設についても取り組んでおり、これらに必要な研究開発も実施している。以下にこれらの概要を述べる。

4.1 キャスク貯蔵施設

キャスク貯蔵施設とは、キャスクを保管貯蔵する施設であり、我国では2010年以降に、原子力発電所内や集中貯蔵施設で本格的に貯蔵が開始される予定である。本施設では、キャスクから放出される熱によりキャスク貯蔵施設内部の温度が上がるのを防ぐため、効率的に熱を外部に逃がす必要がある。通常の施設であれば熱の放出は換気ファンで強制換気することが多いが、キャスク貯蔵施設の場合、停電や機器不良などの不測事態の発生時に機能低下する恐れのある強制換気は採用できない。したがって、キャスクから放出される熱自体を利用し、これを駆動力として、放熱されているかぎり継続的に施設の除熱性能が維持される自然換気方式を採用している。当社では、このシステムを効率化するための研究開発を実施し、様々な施設概念を顧客に提案している。

4.2 キャスク保守施設

日本原燃が青森県六ヶ所村に建設している再処理工場に各原子力発電所から使用済燃料を輸送するため、NFT型輸送キャスクが使用されているが、そのNFT型輸送キャスクを効率的に保守する専用施設が必要となり、当社は1990年より施設の概念設計に着手し、基本設計(1994年から)、詳細設計(1997年から)を経て、2000年から建設工事が始まり、2004年に客先に引渡しを完了した。

施設は除染建屋と保守建屋から構成されており、NFT型輸送キャスクを年間30基保守する能力を有する仕様



Ultra sonic
decontamination device

High pressure water
decontamination device

写真5 キャスク保守施設

Photo 5 Maintenance facility of transport cask

となっている(写真5)。

除染建屋はキャスクの保守に先立って、放射性物質で汚染したキャスクを除染し、作業員の被ばくを低減することを目的とした施設である。高圧水ジェットと超音波除染装置により、遠隔操作でキャスク内部を除染している。

保守建屋は除染後のキャスクを直接保守する施設であり、保守に必要な作業架構、キャスクの搬送を目的とした大型搬送設備で構成されている。

除染、保守設備のほかに、除染で発生する廃液の処理設備、施設を運営するために必要なユーティリティ、電気の受入れ設備、施設の閉じ込め機能を確保する換気設備、放射線管理設備などにより構成されている。

5. 将来展望

我国では2010年ごろから、使用済燃料の金属キャスク

による乾式キャスク貯蔵が実用化する計画であり、キャスクの国内需要が大幅に拡大することが予想され、これに向けて官民で様々な研究開発が行われている。

また、寿命を終えた原子炉の解体撤去時に大量に発生する放射性物質の輸送容器、原子力発電所内に貯蔵されている放射性廃棄物の輸送容器など、今後多くのキャスク需要が見込まれる。

当社においても、貯蔵や輸送の実施主体である電力会社をサポートするために、上記のような研究開発に取り組んでおり、今後も継続していく方針である。

むすび=当社はこれまで、ACL社との共同開発をはじめとして、独自にもキャスクに関する開発を進めてきたが、2002年にACL社との間で、国内を含むアジア地域におけるキャスクの基本設計、開発から販売までの中心的な役割を、トランスニュークリア(株)(TNT社:1984年にACL社と共同で子会社として東京に設立)に持たせることに合意し、現在TNT社は、当社とACL社を代表することになった。当社は、TNT社を支援しながら今後とも原子燃料サイクルの確立にむけ、キャスクの発展に尽力していく所存である。

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).
- 4) 神戸製鋼所研究報告 : 中研第 3787 号 (1983 年 1 月).