

原子力発電所使用済燃料用輸送貯蔵兼用キャスクの設計開発



企業レポート

溝 渕 博 紀*

Development of Storage and Transportation Cask Design
for Spent Fuels at Nuclear Power Site

Key Words : Computer Aided Engineering, Dual Purpose Cask

●はじめに

2011年3月、福島第一原子力発電所で起こった様々な事象はセンセーショナルな映像とともに全世界へ発信された。当時、私は大学での原子力工学専攻を終えてから、原子力発電関連の業務を15年以上経験していたが、我々が安全だと思っていた仮定や想定がいかにも不完全であったかを現実に行き起こっていることで知ることとなった。しかし、報道ではほとんど発信されなかったが、今からお話する「キャスク」という容器は、福島第一原子力発電所内で津波に遭遇したものの、内部に収納した放射性物質である使用済燃料の健全性を維持するという形で、その堅牢性と安全性を示してくれた。

キャスクとは「放射性物質を収納した容器」という意味で使っているが、元々の英語「Cask」は「樽」という意味である。洋酒で「カスク」という言葉も使われている。日本の原子力業界では、「キャスク」は発電所使用済燃料の輸送容器や貯蔵容器を指すことが多い。輸送とは使用済燃料が発生する原子力発電所から使用済燃料を処理または貯蔵する施設までの運搬を指す。日本では海上輸送が主で港から施設までの間では陸上輸送も行われる。輸送専用、貯蔵専用のものであるが、輸送後に収納した燃料を取り出さずにそのまま貯蔵できる、あるいは貯蔵後に収納物を取り出さずにそのまま輸送できる、輸送貯蔵兼用キャスクのニーズが高まってきている。

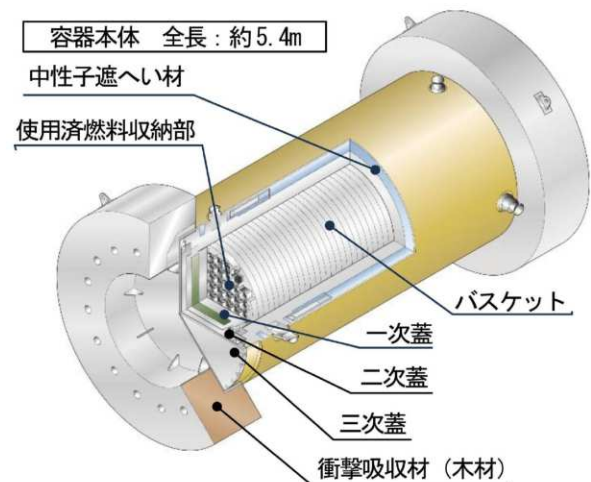


図1 輸送兼貯蔵キャスクの設計例 (輸送状態)

本稿では当社のキャスク設計についてお話したい。

●使用済燃料の特徴

軽水炉と呼ばれる日本の商業用発電で最も多い原子炉で用いられる燃料の特徴に対し、これを安全に収納し外部へ有意な影響を及ぼさないための容器設計は合理的に行う必要がある。国内の軽水炉発電に用いる燃料は、主にウラン酸化物を内包・密封した金属製のパイプ状の燃料棒というものが、束ねられた角柱形状をしている。この燃料は原子炉内で核分裂に伴う崩壊熱を生み、反応を継続していくうちに、放射線を発する物質の含有率が高まっていく。発電後に原子炉から取り出される「使用済燃料」には、次のような特徴がある。

- ・高さ4m超の角柱形状
- ・ペレット状の核燃料物質は被覆管内に収納・密封
- ・燃料同士の配置が揃うと臨界(反応が連続する状態で発電はこの状態を長く維持する)になる
- ・強い放射線を出す
- ・放射性物質で表面が汚染している
- ・冷却しなければ燃料自身が溶けてしまう程の崩壊



* Hironori MIZOBUCHI

1970年5月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 原子力工学専攻博士前期課程 (1996年)
現在、株式会社 オー・シー・エル
取締役 エンジニアリングセンター長
修士
専門/原子力工学
TEL : 06-6225-9510
FAX : 06-6225-9540
E-mail : h-mizobuchi@ocl-corp.co.jp

熱を長期間にわたって発生する

- ・再処理対象（燃料棒内の放射性物質を再処理すれば再度発電に使える）
- ・原子炉でトラブルがあれば炉内から取り出される（原子炉は常に炉内燃料を取り出せるスペースを確保した燃料プールを備えて運転している）

●使用済燃料の居場所

前節でも少し触れているが、原子炉内では燃料からの発熱を水→水蒸気にするエネルギーとして取り出し、水蒸気で発電機タービンを回すことで発電している。使用済みとはいえ、原子炉内から取り出された燃料は、非常に高温のため、冷却をしないと金属の融点を超えて自己溶解してしまう。そこで、使用済燃料は使用済燃料プールという深い貯水槽で冷却しながら保管される。福島での事故では、外部電源が遮断されたことにより、原子炉やプールの冷却機能を失ったため、燃料の周りの水が蒸発してなくなり、金属の塊である燃料集合体が溶けて、原子炉の構造物も溶かして落ちていき、「燃料デブリ」になったと考えられる。一方で、プール水の対策では消火用放水やヘリコプターから海水を投下する等も試みたが、最終的には高層ビル建設等でコンクリートを高所に注入できる設備を使って高所にある燃料プールに水を送り込むことでプールでの燃料溶解は避けることができた。この事故対応でもわかるように、燃料プールは高い冷却能力を有する半面、電源喪失時は機能しない欠点がある。

キャスクは、内部に水がある湿式と水がない乾式の2種類が存在するが、いずれも収納している燃料をキャスクの周りの空気による自然空冷で冷却する機能を有している。このため、電源喪失していないプールに比べて冷却能力は低くなり、使用済燃料の収納率では、プールにはかなわない。しかし、使用済燃料は、炉内からの取り出し後の期間が長くなるにつれて発熱量が低減するため、プールでの冷却期間を10年以上に設定すれば、キャスクでも収納率は少し改善されることになる。燃料プールは原子炉内にある燃料を全量収納できる「空き容量」を確保して運転する必要があるため、燃料プールには使用済燃料保管量の上限値が存在する。再処理施設等へ使用済燃料が搬出輸送できる場合は、輸送キャスクでプール内使用済燃料保管量を減らすことが可能であるが、再処理施設が稼働していない等の理由で燃

料プールの使用済燃料が搬出されずに増えてくると、効率面では劣るが、貯蔵キャスクに使用済燃料を収納することで、プール容量を確保することになる。福島第一原子力発電所でも、このような目的で一部の使用済燃料がプールから貯蔵キャスクへ移されて貯蔵状態にあった。

使用済燃料を輸送する輸送キャスクは、国内だけでなく海外へも輸送されることもあり、輸送キャスクは国際原子力機関IAEAの定めた設計要件を日本の法令に取り込んでいる。輸送キャスクは国際輸送にも耐える能力を要求されており、輸送中に遭遇する可能性のある様々な自然環境や事故にもある程度対応できるように設計されている。貯蔵専用キャスクでは、輸送時の事故に耐える能力までは求められていないものの、設計では輸送キャスクの設計基準を準用していることが多く、結果、非常に堅牢な構造となっている。これが、津波に遭遇しても収納している燃料の健全性を維持できた要因と言える。

福島での使用済燃料に関わる経験から、キャスクは使用済燃料を貯蔵するための安全性が高いことがわかると、使用済燃料貯蔵の主軸は「プール貯蔵」から「キャスク貯蔵」へと移行することになる。



図2 放射線測定中の輸送キャスク

●輸送兼貯蔵キャスクの設計と収納物の関係

収納物である使用済燃料の特徴から、輸送貯蔵兼用容器として要求される設計イメージは、図3に示すように、「閉じ込め（密封）」「除熱」「未臨界」「遮へい」の4つの機能と、それを想定された環境条件でも維持するための「構造強度」という要素をすべて満足できなければならない。この5つの設計要素を「キャスクの5大安全機能」と呼ぶこともあり、キャスク設計は、この5つの安全機能をニーズに合わせてバランスさせることで成立することになる。

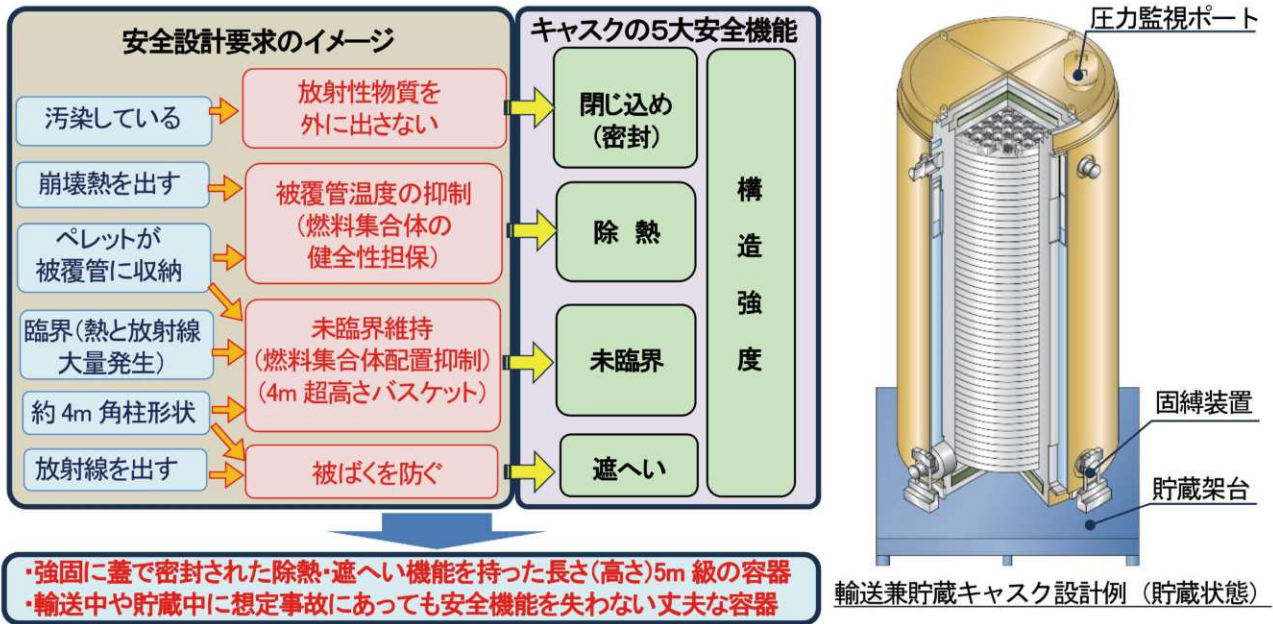


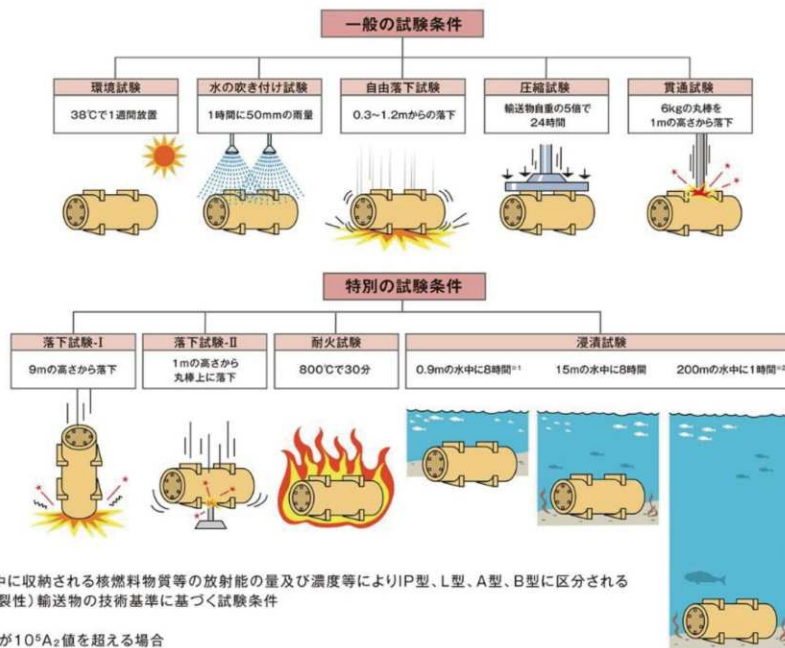
図3 収納物である使用済燃料の特徴から要求される輸送貯蔵兼用カスク設計 (右は設計例)

法令要求となる設計に対する国の安全審査も、この5つの要素に対して要求に合致しているかを確認することになる。

●カスクの設計要求

輸送容器としてカスクに求められる設計要件は多岐に渡るが、「輸送中に周辺環境へ有意な影響を与えない」という原則に基づいていると言える。そ

輸送容器の安全性



7-8-2

原子力・エネルギー図面集

図4 輸送容器の安全性 (出典:一般社団法人 日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」より転載)

のために、安全要素ごとに基準や要求がある。国際原子力機関 IAEA が定めた輸送規則に準拠した試験条件を図 4 に示す。

一般の試験条件は通常輸送中に起こりうる事象に基づいており、特別な試験条件は事故遭遇時の想定と考えられる。この設計基準は、輸送中にこれを超える過酷な事象はないという考えではなく、このレベルの事故でも安全性を担保できる設計の容器であれば、国際輸送に供しても取り返しのつかないことにはならないという「想定基準」と理解しているが、特別な試験条件は過酷であり、この要求を満たす設計を高い次元で成立させるには、緻密な計算や解析による検証で安全性を証明することが求められる。

●設計でのアプローチ

当社だけでなく、世界のどのキャスク設計担当も同じであるが、このような高度で緻密な設計には、コンピューター上でコードを駆使する CAE 解析が必須となっている。原子力特有とされる「未臨界」や「遮へい」もコードによる計算は必須であるが、「構造強度」や「除熱」の解析で用いるコードは、他の工学でも使用される汎用コードを用いている。原子力用のキャスクといえども、構造強度や熱伝達の世界では、他の工学の金属材料や木材の挙動としては同じであるためである。

図 5 に特別な試験条件の「落下試験-I」を有限



図 5 9m 水平落下における解析例

要素法で解析した例を示す。9m 落下試験時において衝撃吸収材を通じて容器へ伝わる応力から、密封性を確認している。

図 6 に除熱設計で解析コードを用いている例を示す。色で解析結果の数値を示すコンター図では、高温ほど赤色系、低温程青色系の表示にすることで直感的に結果がわかるようにすることが一般的である。

このようなコードを用いた解析による評価については、実際の挙動に対し、安全に評価できていることが証明されている事が必要となる。したがって、新規性の高い設計や材料を適用するキャスク設計では、実際に落下試験（スケールモデルを用いることが多い）を行って、コードの妥当性検証を行うことがある。図 7 は当社設計の輸送貯蔵兼用キャスクの水平落下試験後の落下試験体写真と解析結果である。衝撃緩衝材として複数の木材とそれ以外の金属材料を組み合わせた複雑な形状であっても、きちんと解析上の条件設定やモデルが作成がなされていれば、実際の挙動に合致した結果が得られている。落下試験体には、大量のセンサーが取り付けられており、実際の金属に発生している「歪み」を測定し、解析結果との整合性も確認する。

設計のたびに破壊試験や実測試験をしては設計に要するコストや時間が膨大になることはもちろんだが、CAE なしで高度な設計は不可能になっているというのが実際のところだと感じている。これ

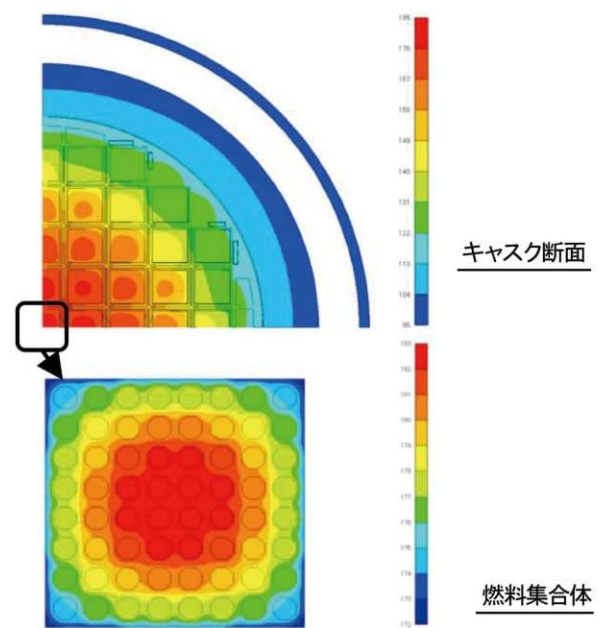


図 6 除熱設計における解析例

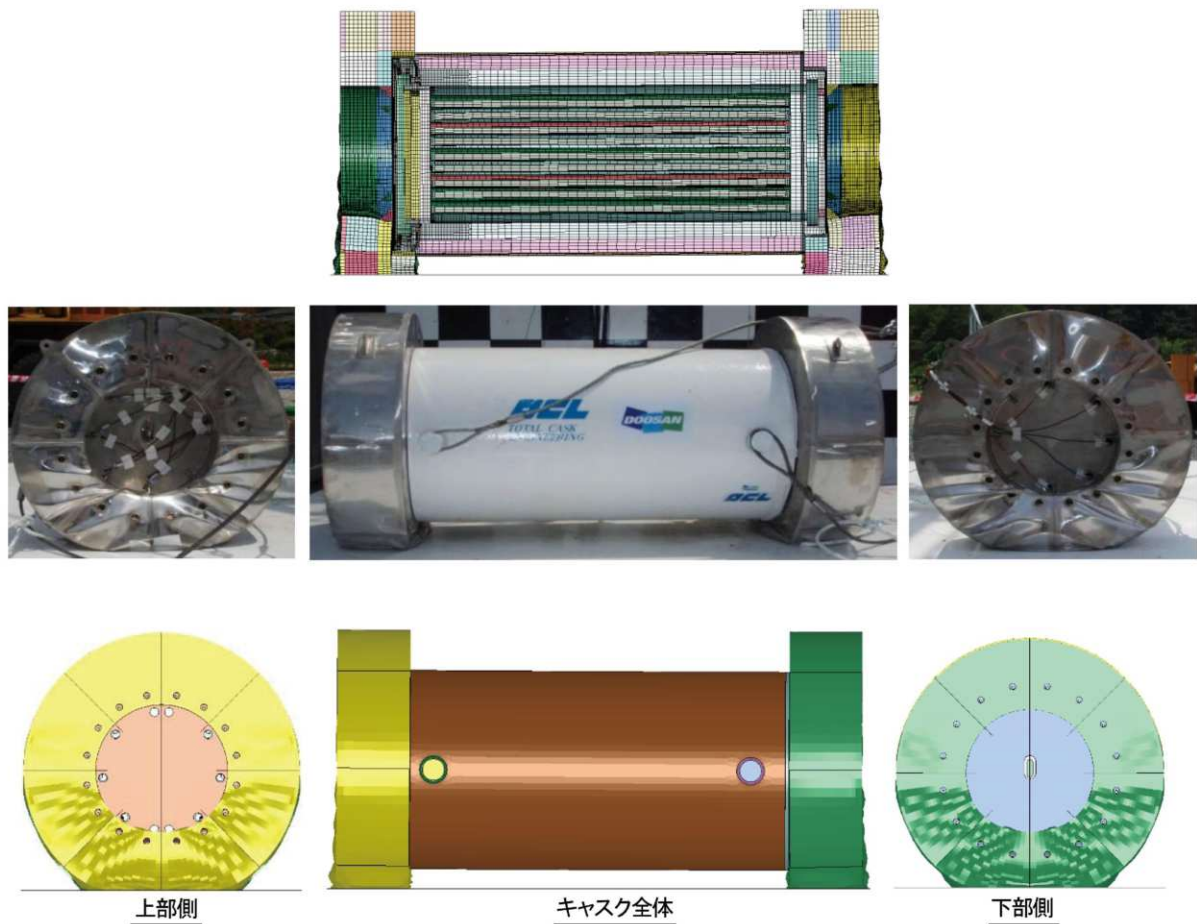


図7 水平落下試験後の試験体と解析結果¹⁾

は、原子力の世界だけの話ではなく、複雑な形状をした一般の工業製品設計でも同じ状況だと思われる。

●おわりに

本稿では、原子力発電において非常に重要な役割を果たしている「キャスク」という、大型で重厚な容器の設計について紹介させていただいた。国内では原子力発電用燃料は再処理をしてリサイクルすることを前提としている。つまり、使用済燃料は、放射性廃棄物が含まれているものの、有効活用できるエネルギー源が含まれている。この使用済燃料を、原子力発電所の燃料プールから搬出し、移動したり、貯蔵したりするためには「キャスク」という存在は必要不可欠であり、使用済燃料の燃料プールでの保管量が原子力発電所の運転継続に影響を与えるという観点では、「原子燃料サイクルのアキレス腱」とも言える。また、原子力発電所の廃炉が進む過程では、

燃料以外の放射性廃棄物も大量に輸送、貯蔵が必要になり、キャスクの技術なしでは廃炉作業は完結しない。

キャスクのニーズは非常に高まっており、最新の技術や優秀な人材の投入が望まれる。原子力技術の世界も、若い世代の力で継続が必要であることは間違いない。この状況下で、大学が果たすべき役割に期待せずにはいられないというのが、関係企業側の熱烈な気持ちである。

参考文献

- 1) Kawakami, Yuichi Motegi “Development of Spent Fuel Transportable Storage Cask (2) 9m Drop Tests by Scale Model”, PATRAM2010, London, UK, October 3-8, (2010).