



# MOX輸送の動向

平成20年9月5日

日本原子力研究開発機構  
核不拡散科学技術センター

北村 隆文

日本原子力学会 2008秋の大会 核不拡散・保障措置・核セキュリティー連絡会企画セッション  
2008./9/5 高知工科大学

1. MOX輸送の歴史、実績
2. MOX燃料、輸送の特徴、安全対策
3. 輸送の事例、変遷
4. 輸送情報管理
5. MOX輸送の動向
6. まとめ

	昭和			平成	
	40年(1965)	50年(1975)	60年	元年(1989)	10年(1998)
航空輸送	海外からの航空輸送 ←-----→				
海上輸送		海外から海上輸送 ★ 「晴新丸」輸送			★ 「あかつき丸」輸送
陸上輸送		ふげんMOX新燃料輸送 S52年～H14年(計45回) -----→			常陽MOX新燃料輸送 S51年～H20現在(計118回) -----→
				もんじゅMOX新燃料輸送 H4年～H20現在(計13回) -----→	
条約、協定、技術開発等		二国間原子力協定		▲ 新日米協定	
		核物質防護条約発効		▲ 発効	
		もんじゅ輸送容器に関する解析と試験 (Sandia Lab.)		プルトニウム航空輸送容器開発 (Sandia Lab.)	
			プルトニウム航空輸送容器開発 (Battelle Columbus)		
				輸送緊急時対応技術開発	
				輸送核物質防護研究開発	



# JAEAのMOX燃料製造実績

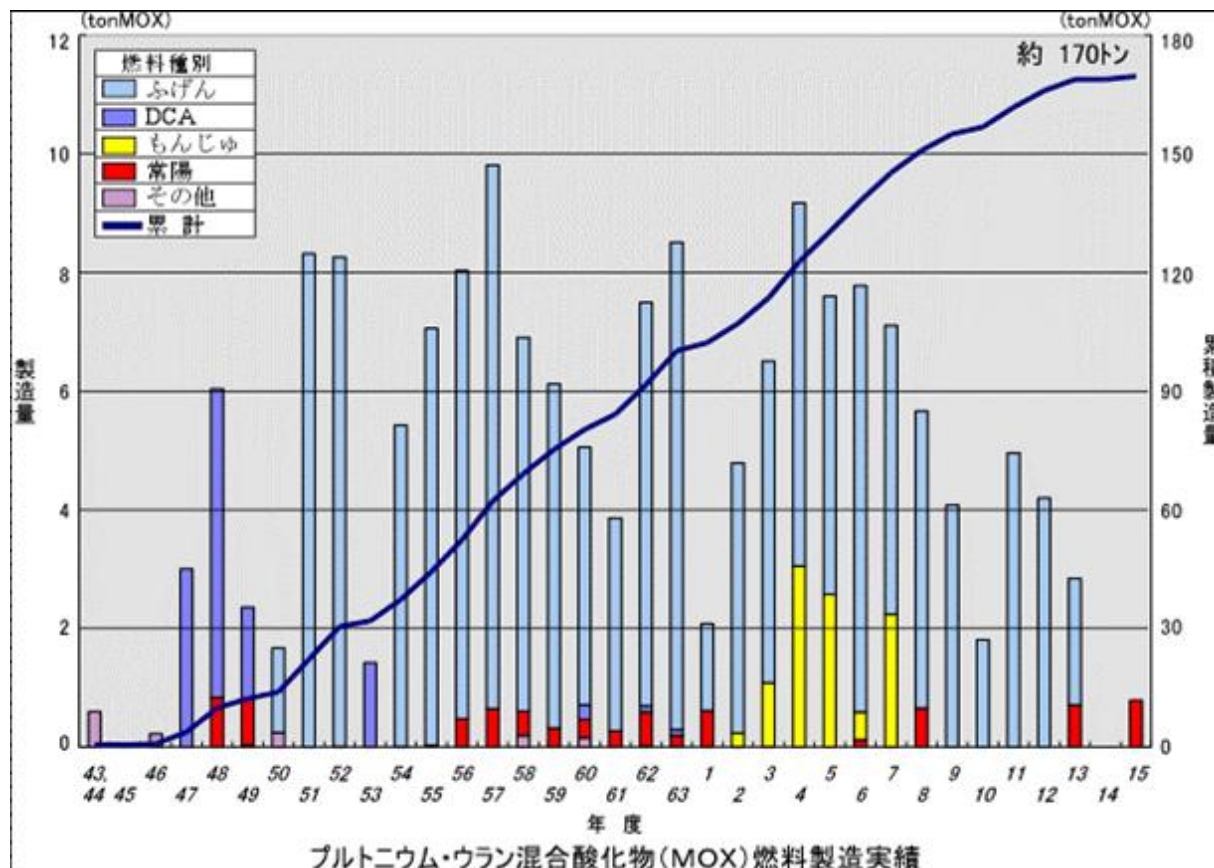


JAEAのサイクル工学研究所プルトニウム燃料製造施設のMOX燃料製造実績

・新型転換炉ふげん、高速実験炉常陽、高速増殖原型炉もんじゅ用燃料

累積MOX生産量 : 170トン(Pu量で6.0トン) (熱中性子炉用は150トン)

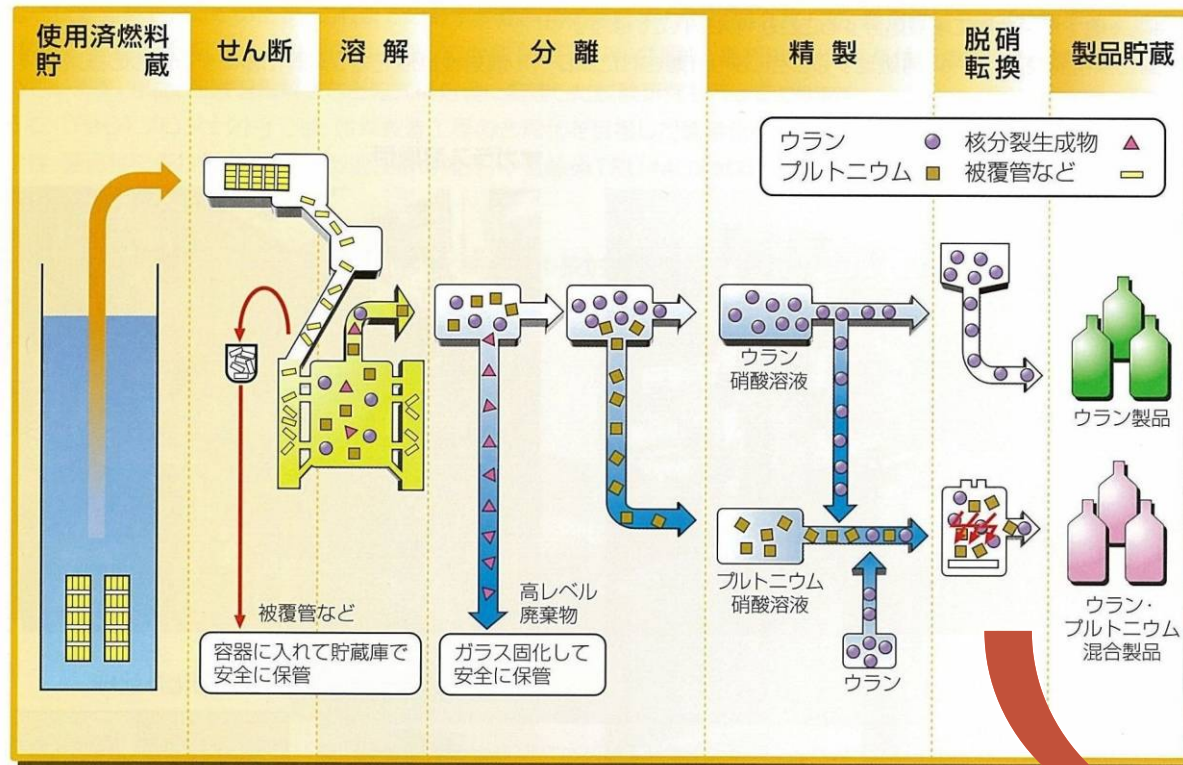
いずれも世界トップレベルの生産量であり、原子炉内で健全性を維持



MOX燃料生産量

燃料種類	体数	MOX量
FBR もんじゅ	285	約10トン
FBR 常陽	660	約7トン
ATR ふげん	773	約139トン
BWR (敦賀)	2	約0.1トン
SGHWR (英国)	2	約0.3トン
ATR DCA		約12トン
その他		約2トン
合計	1722	約170トン

東海再処理工場におけるMOX粉末製造には、核不拡散性への配慮から、使用済燃料を分離・精製して得られるウラン硝酸溶液とプルトニウム硝酸溶液を溶液状態で混合し、マイクロ波加熱で直接、溶液からMOX粉末を製造する工程を採用している。(マイクロ波加熱脱硝法)



マイクロ波加熱脱硝法

## 4.2 輸送物の種類と輸送容器の構造

### MOX燃料

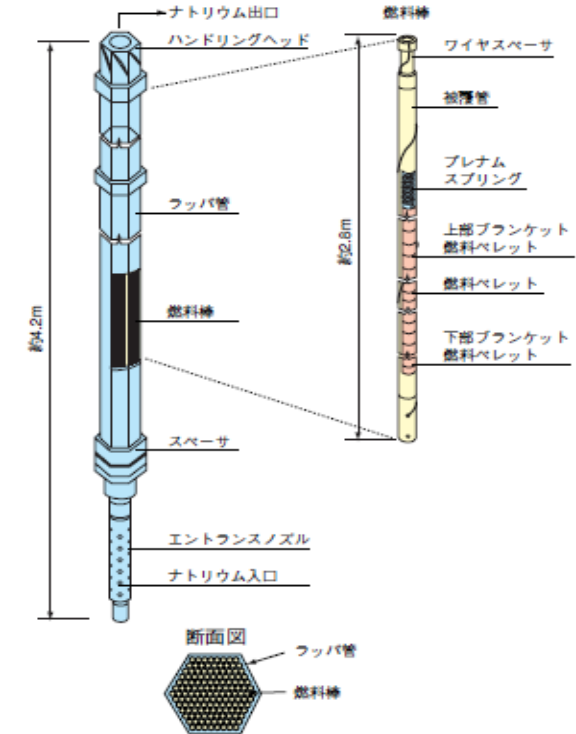
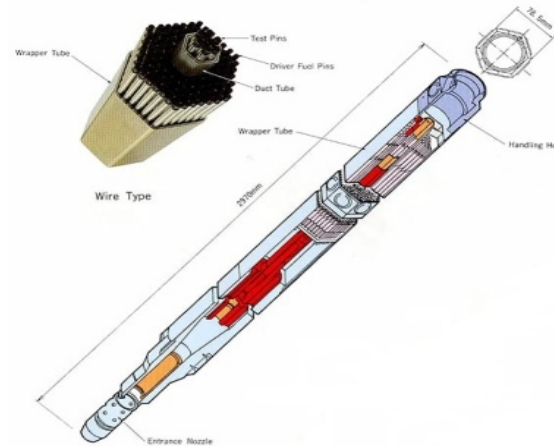
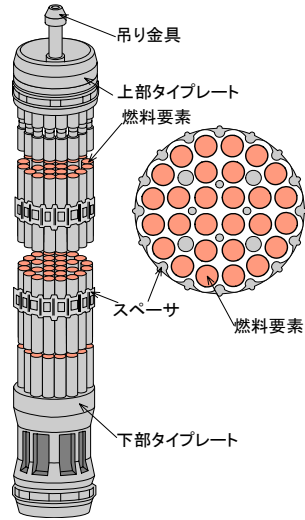
ウラン・プルトニウム混合酸化物 (Mixed Oxide) 燃料

- 融点：PuO<sub>2</sub>融点 (約2400℃)  
UO<sub>2</sub>融点 (約2800℃) との間  
UO<sub>2</sub> とPuO<sub>2</sub>の割合に応じた温度
- 理論密度：11.46g/cm<sup>3</sup> (PuO<sub>2</sub>)  
MOXの密度：約11g/cm<sup>3</sup>
- 色：緑色 (PuO<sub>2</sub>粉末)  
鈍黄土色 (1200℃以上に加熱)  
黒褐色 (MOX燃料ペレット)



二酸化プルトニウム

## 《プルトニウム燃料第二開発室》



### ★ふげん用燃料集合体の仕様

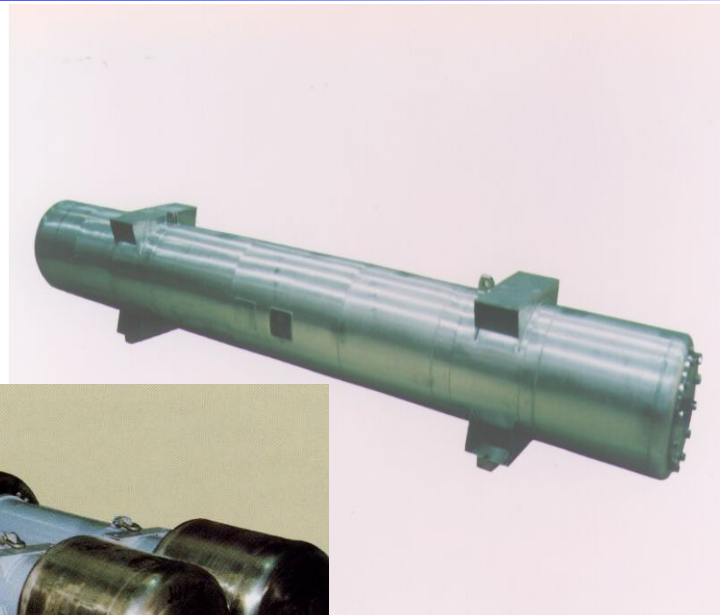
- ・ 外径：約 13 cm
- ・ 全長：約 4.4 m
- ・ 重量： 230 kg以下
- ・ 燃料要素：28本  
(内層 4本、中間層8本、外層16本)
- ・ MOX重量：184 kg 以下
- ・ Pu重量：6.6 kg 以下
- ・ U重量：157.5 kg 以下
- ・ Pu富化度：内層 1.6 wt%以下  
中間層 1.6 wt%以下  
外層 1.1 wt%以下

### ★常陽用燃料集合体の仕様(MK-Ⅲ)

- ・ 外径：約 8 cm
- ・ 全長：約 3 m
- ・ 重量： 70 kg 以下
- ・ 燃料要素：127本
- ・ MOX重量：13.6 kg 以下
- ・ Pu重量：2.2 kg 以下
- ・ U重量：25 kg 以下
- ・ Pu富化度：19 wt% 以下

### ★もんじゅ用燃料集合体の仕様

- ・ 外径：約 11.5 cm
- ・ 全長：約 4.2 m
- ・ 重量： 185 kg 以下
- ・ 燃料要素：169本
- ・ MOX重量：35.5 kg 以下
- ・ Pu重量：10 kg 以下
- ・ U重量：49 kg 以下
- ・ Pu富化度：32wt% 以下

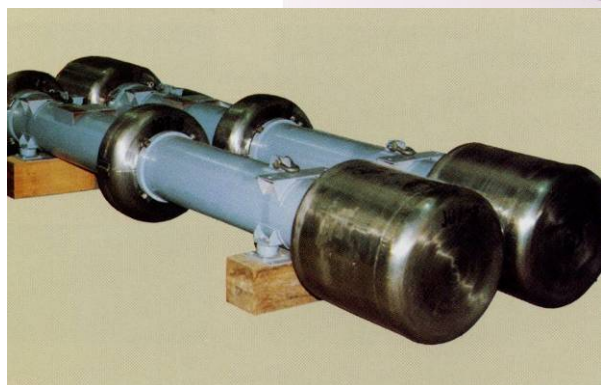


## MONJU-F型(もんじゅ新燃料用)

種類: BU型核分裂性輸送物  
輸送容器の外形寸法及び重量

- ・ 外径 : 約0.6 m
- ・ 長さ : 約 5 m
- ・ 重量 : 約2.3 ton

核燃料輸送物の総重量: 2,630kg以下  
収納体数 : 2体



## TN-9121/B型(常陽新燃料用)

種類: BM型核分裂性輸送物  
輸送容器の外形寸法及び重量

- ・ 外径 : 約0.6 m
- ・ 長さ : 約 4 m
- ・ 重量 : 約0.6ton

核燃料輸送物の総重量: 710kg以下  
収納体数 : 1体



## TN-9180/A型(ふげん新燃料用)

種類: BM型核分裂性輸送物  
輸送容器の外形寸法及び重量

- ・ 外径 : 約0.7 m
- ・ 長さ : 約 5 m
- ・ 重量 : 約1.2 ton

核燃料輸送物の総重量: 1,670kg以下  
収納体数 : 2体



MOX輸送容器の設計:プルトニウムの放射線的特性を考慮した輸送容器の設計の重要性。

プルトニウムの特徴	輸送物設計(構造、熱、密封、遮へい、臨界)
発熱量が大きいこと。 ・約0.6W/Pu238 1g ・約0.003W/Pu241 1g ・約0.03W/平均的組成Pu 1g	MOX粉末、MOX燃料集合体の中心温度、密封境界(リング等)の到達温度等への配慮
アルファ線放出体としての毒性	十分な密封性能を担保への配慮
放射線強度(中性子(自発核分裂、 $\alpha$ -N反応)、一次・二次 $\gamma$ 線)	中性子対策:レジン、ボロン、水素等を含む充填材 ガンマ線対策:適当な厚みの鉄、鉛等鋼材、放熱フィン等の採用
小さい臨界質量	臨界形状管理、中性子吸収体

## 【輸送前】

輸送経路や道路情報を十分調査、綿密な安全輸送の計画を立案、通過経路の都道府県公安委員会への輸送計画届け出と指導や指示の受領  
事故対応訓練、通信連絡訓練

## 【輸送実施出発時】

輸送物の放射線量が法令基準を満足することの確認、積載車への確実な固縛



## 【輸送中】

輸送従事者：運行責任者、輸送物の専門的知識を有する同行専門家、放射線取扱主任者、警備員などで構成

輸送中、駐車中の通信機器等による車両間、輸送実施本部と常時連絡



# 輸送事故時の原子力事業者の応急対策



## 事故が発生した場合

### 危険時の措置の実施

直ちに国(安全規制担当省庁)、最寄り警察、消防機関に通報

### 応急措置の実施

- ①消火、延焼防止の措置
- ②輸送物の安全な場所への移動
- ③立入り禁止区域の設定
- ④モニタリングの実施
- ⑤運搬従事者や付近にいる者の避難警告
- ⑥汚染及び漏えいの拡大防止及び汚染の除去
- ⑦放射線障害を受けた者の救出、避難等の措置
- ⑧遮へい対策の実施
- ⑨その他放射線障害の防止に必要な措置

## 特定事象に至った場合

### 事象発生時の通報

直ちに主務大臣、事象が発生した場所を管轄する都道府県知事及び市町村長に通報

### 原子力災害の発生の防止措置

危険時の措置の継続  
 現場に派遣された国の専門家の助言を踏まえて、主体的に実施。  
 直ちに必要な要員を現場に派遣  
 必要に応じ、他の原子力事業者への要員及び資機材の派遣要請

特定事象	運搬容器から1mの位置での放射線量	運搬容器からの放射性物質の漏洩
事象通報すべき事象(原災法第10条)	100 $\mu$ Sv/h以上	放射性物質の漏えい又は漏えいの蓋然性が高い場合
原子力緊急事態(原災法第15条)	10mSv/h以上の放射線を検出	A2値の放射性物質が漏えいまたは漏えいの蓋然性が高い場合



# JAEAのMOX輸送の事例



## ふげんMOX新燃料集合体輸送

- ・昭和52年～平成14年で計45回
- ・輸送集合体数: 773体／約134ton

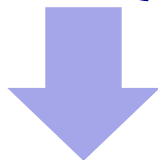
## 常陽MOX新燃料集合体輸送

- ・昭和51年～平成20年現在で計118回
- ・輸送集合体数: 646体＋照射用燃料要素: 942体／約7,900kg

## もんじゅMOX新燃料集合体輸送

- ・平成4年～平成20年7月現在で計13回
- ・輸送集合体数: 285体／約9,600kg

## その他、海外照射試験試料の海上輸送



百数十回の輸送において、事故は一切なく、安全輸送を達成。

## 核燃料施設の保障措置

⇒分析標準試料(少量のPu、U)が必須

⇒海外からは航空輸送(少量Puでも海上輸送は困難)

## 原子力災害対策特別措置法(原災法)

⇒B型、A型及びIP型核燃料輸送物の荷役中、輸送中での事故対応

⇒航空輸送版原子力災害対応マニュアル策定要領(平成15年10月航空局)

例:①化学形態:硝酸プルトニウム溶液、②核燃料物質の種類:非核分裂性輸送物 第I類-白、③重量:1g-Pu未満、約1/2 A2値、④数量:3個(1輸送容器)、⑤輸送容器

輸送経路例:「仏国:研究所」→(陸送)→「仏国:シャルル・ド・ゴール空港:A型輸送容器」→(空輸)→「日本国:成田空港」→(陸送)「日本国:JAEA(当時JNC)」



輸送物の引取



線量率測定  
(輸送物)



固縛完了



線量率測定  
(車両)



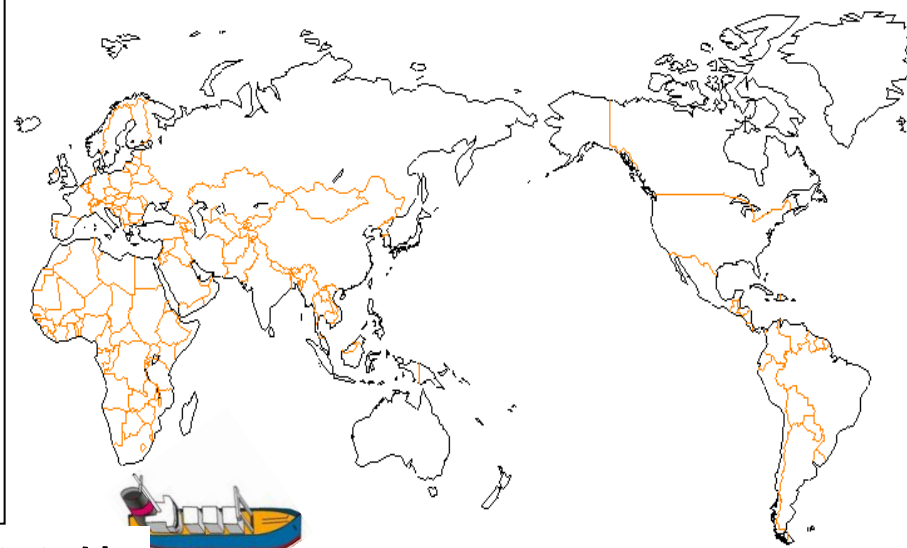
積載完了

昭和59年10月～11月、返還Puの海上輸送を日米原子力協定に基づく個別同意の下、「晴新丸」による海上輸送を実施

輸送量：約280kg-PuO<sub>2</sub>

容器：FS-47型（BU型）

経路：ラアーグ⇒シェルブール⇒東海村



次回以降の輸送は核不拡散への配慮から航空輸送を目指すこととなった。しかしながら、以下のあかつき丸輸送が実施された。

平成4年11月～平成5年1月、昭和63年7月に発行した新日米原子力協定における包括同意の下、「あかつき丸」による海上輸送を実施。

輸送量：約1.7t-PuO<sub>2</sub>

容器：FS-47型（BU型）133基

経路：ラアーグ⇒シェルブール⇒東海村（59日間）



Plutonium transport ship, the Akatsuki Maru



## 返還Pu輸送への新日米原子力協力協定の適用

・『原子力の平和的利用に関する協力のための日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定』(昭和43年制定)が改定され、昭和63年7月17日発効。  
⇒米国籍の核物質の使用、貯蔵、輸送等に対する包括同意要件

### 【輸送方法選択の変遷】

Pu返還を航空輸送で実施すべく技術開発開始(昭和59年)

米国のNUREG-0360基準

さらに厳しいマコウスキー基準の出現

海上輸送方式を選択

回収プルトニウム国際輸送のための指針:

実施取極附属書5(A:航空輸送、B:海上輸送)のガイドラインを規定

防護の水準の規定:核物質の種類、量により防護の水準が区分される。(最も厳しい区分1:プルトニウムは、2kg以上)

仏国からの「あかつき丸」による返還Pu海上輸送に初めて適用

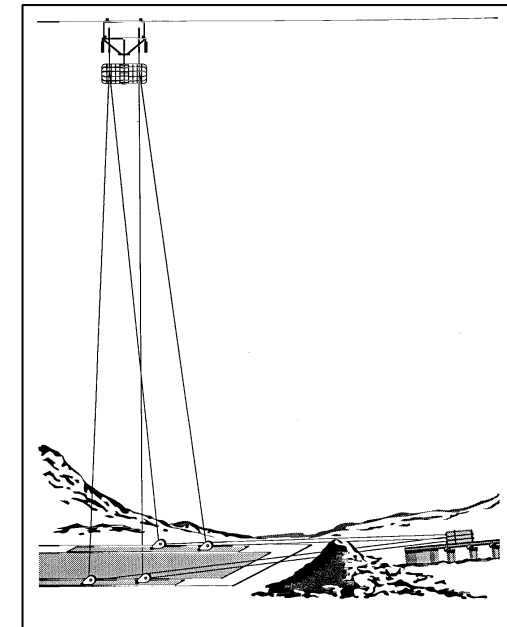
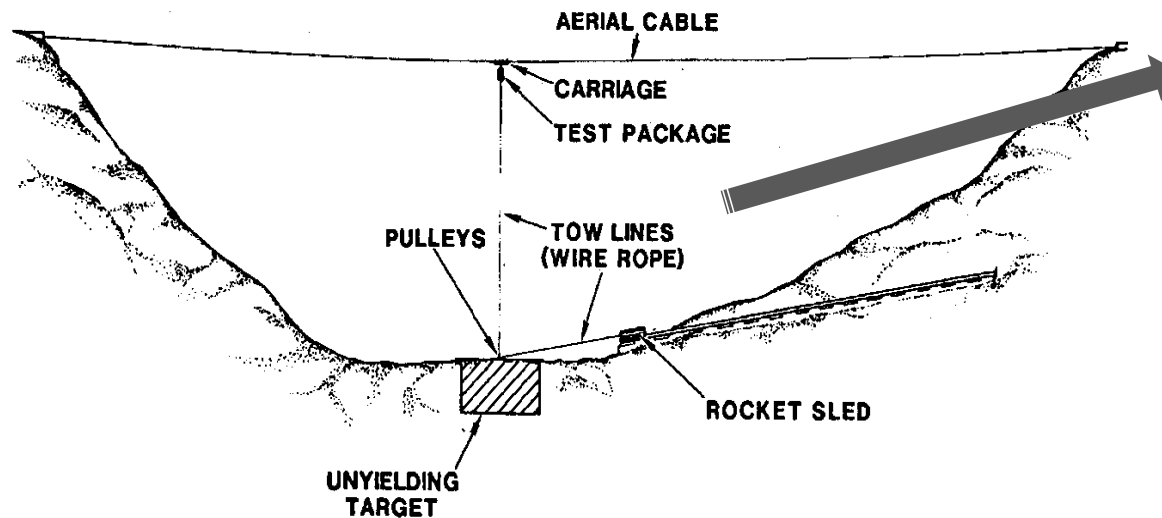
## 附属書5 回収プルトニウムの国際輸送のための指針

A 航空輸送	B 海上輸送
<ul style="list-style-type: none"><li>1. 北極経由等の回避、専用貨物航空機</li><li>2. 輸送計画書<ul style="list-style-type: none"><li>(a)武装護衛者</li><li>(b)輸送従事者の信頼性</li><li>(c)飛行場での防護(武装要員他)</li><li>(d)輸送容器の健全性(航空機墜落)</li><li>(e)先端技術を用いた通信系</li><li>(f)位置監視に関するオペレーションセンター</li><li>(g)緊急時計画</li><li>(F)関係当局の特定計画の確認</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>1. 騒乱地域等の回避専用輸送船による無寄港輸送</li><li>2. 輸送計画書<ul style="list-style-type: none"><li>(a)武装護衛者</li><li>(b)輸送従事者の信頼性</li><li>(c)港での防護(武装要員他)</li><li>(d)クレーン不働化、輸送容器への位置発信器の装備等</li><li>(e)先端技術を用いた通信系</li><li>(f)位置監視に関するオペレーションセンター</li><li>(g)緊急時計画</li><li>(F)関係当局の特定計画の確認</li></ul></li></ul>



## NUREG-0360基準

衝撃試験	非降伏面へ129 m/sでの衝撃
圧潰試験	静的圧縮 32 ton
貫通試験	高さ3 m から貫通棒上への落下
引裂試験	45.3 kg の山形鋼を 高さ46 mから落下
火災試験	60 分間の航空機燃料のプール火災
浸漬試験	深さ0.9mの水中へ8時間の浸漬
合格基準	密封容器破損なし、漏えいA <sub>2</sub> /week以下



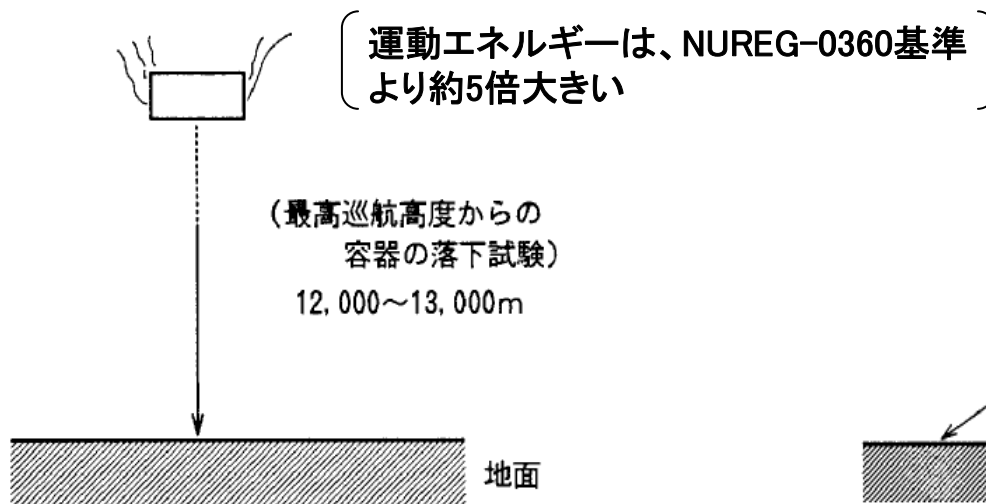
- ・平成元年、原子力委員会決定「プルトニウム返還輸送の当面の進め方」  
(次回返還プルトニウム輸送は海上輸送方式)
- ・平成4年マコウスキー基準の具体的な技術基準案策定

## 最悪ケース(Worst case)の事故を模擬

- ・1987年12月7日にカリフォルニアで発生したPSAフライト1771便の事故
- ・砂岩表面上へ角度60度で速度282m/sでの激突

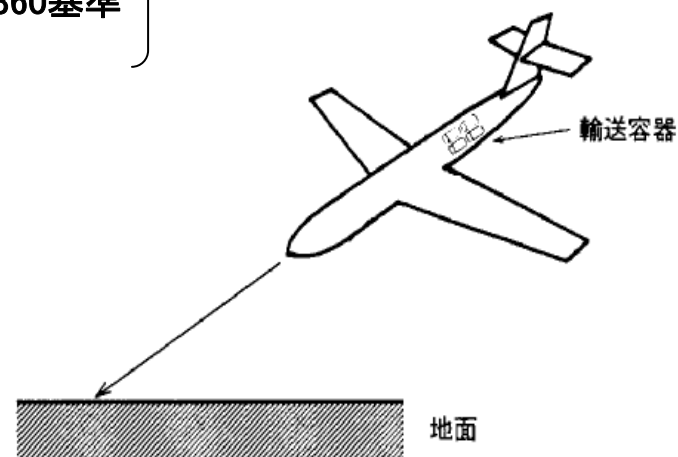
### 1. 輸送容器落下試験

試験物質をつめた当該容器実スケール供試体を最高巡航高度から実際に落下させる試験



### 2. 航空機の墜落試験

試験物質をつめた実スケール試験容器を満載した輸送機を実際に墜落させる試験





# 核物質輸送に係る情報の管理

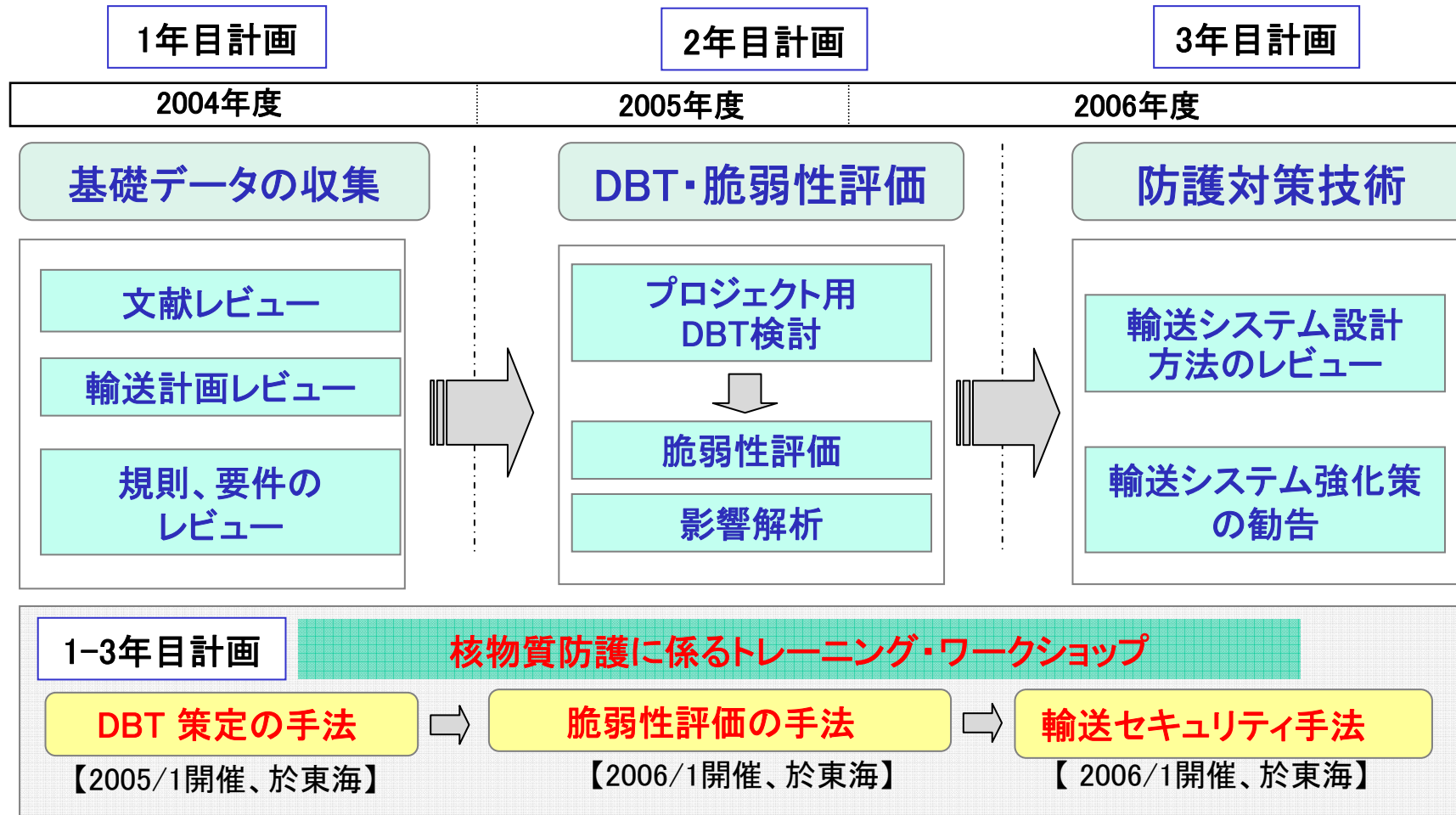


## 「防護対象特定核燃料物質の輸送に係る核物質防護に関する情報の取扱い」 経産省保安院、文科省、国交省の通達(平成17年11月)

核物質防護秘密として厳重な管理を講ずべき情報 (「秘密情報」と称するもの)	核物質防護秘密として適切な管理を講ずべき 事項(「管理情報」と称するもの)
<p><b>(1) 輸送の前後を問わず核物質防護秘密として扱うべき情報</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送経路に関する詳細な情報【区分Ⅰ,Ⅱ】(*1)</li> <li>・主務大臣が定めるDBTに関する情報</li> <li>・DBTに対応して講ずる防護措置に関する情報</li> <li>・緊急時対応計画</li> <li>・警備・監視体制(車列編成,固有の通信手段等)に関する情報</li> <li>・車両・船舶等の防護の設備・構造(接近・移乗防止装置等)に関する情報</li> </ul>	<p><b>(1) 輸送の前後を問わず管理を講ずべき情報</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送時の施錠・封印に関する詳細な情報【区分Ⅰ,Ⅱ】(*2)</li> <li>・輸送経路に関する詳細な情報【区分Ⅲ】・</li> </ul>
<p><b>(2) 輸送終了時まで核物質防護秘密として扱うべき情報</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送通過予定時刻【区分Ⅰ,Ⅱ】(*1)</li> <li>・輸送数量、容器個数【区分Ⅰ】(*1)</li> </ul>	<p><b>(2) 輸送終了時まで管理を講ずべき情報</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送通過予定時刻【区分Ⅲ】</li> <li>・輸送の発着時刻</li> <li>・船名・車両番号等輸送手段を特定し得る情報</li> <li>・輸送業者名(輸送手段を特定されない場合を除く。)</li> </ul>

\* 1): 事故発生時に必要な通報等を行う場合は除く。

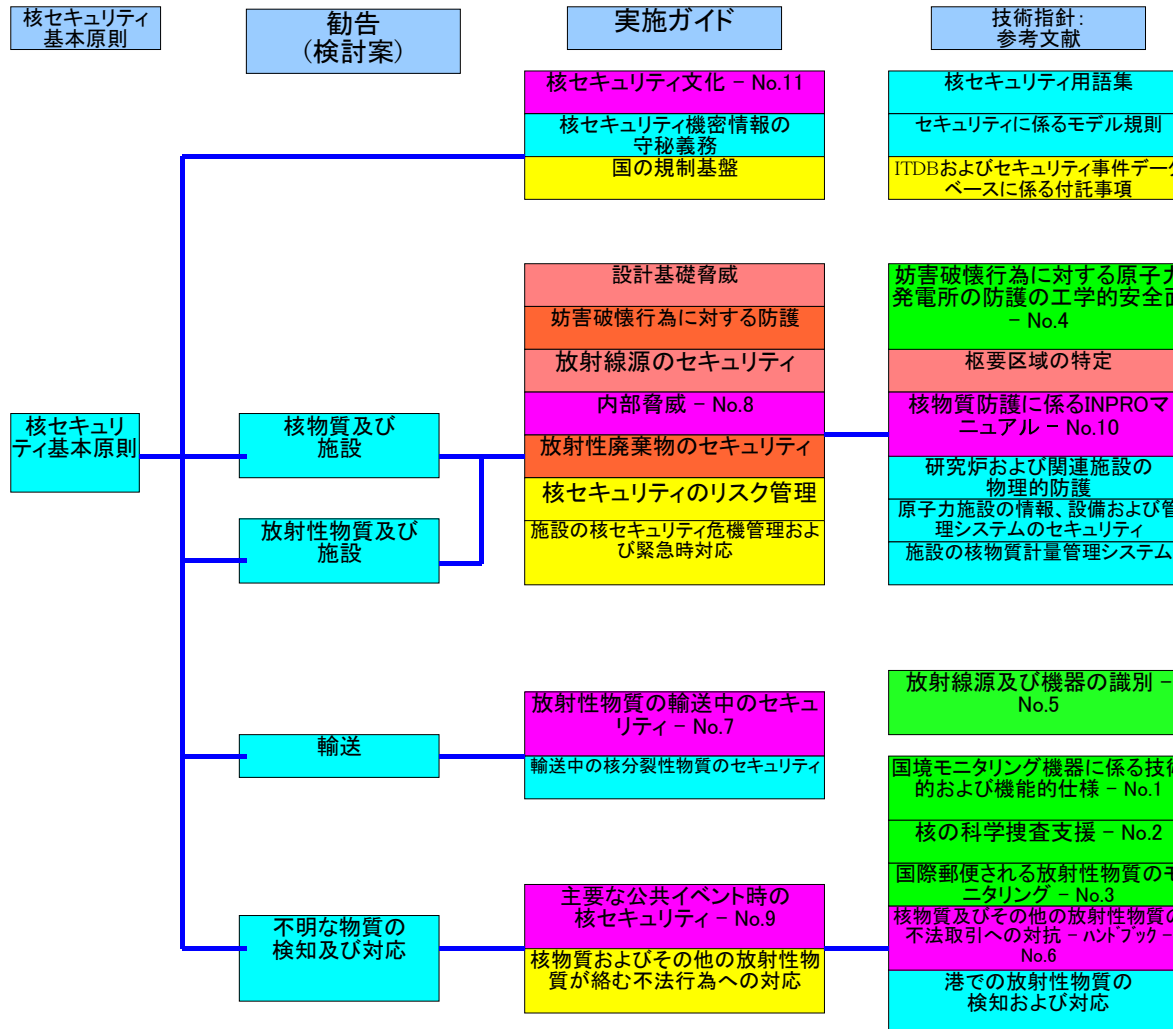
\* 2): 区分Ⅲの輸送であって、その方法が区分Ⅰ又はⅡと同様の方法の場合を含む。



評価対象：国内の区分I物質に該当する核燃物質輸送の代表例



## 核セキュリティ・シリーズ文書体系



凡例
出版済
最終段階
加盟国によるコメント待ち
加盟国へコメント要求予定
レビュー中
計画中

## 敦賀地区

もんじゅにおけるFBRサイクル実用化に向けた研究開発、ふげんにおける廃止措置研究、防災研修の実施



ふげんSF  
もんじゅPIE

六ヶ所再処理(JNFL)

MOX粉末

MOX新燃料  
(もんじゅ、常陽)

海外濃縮  
ウラン試験  
研究炉新  
燃料

試験研究炉SF

## 大洗地区

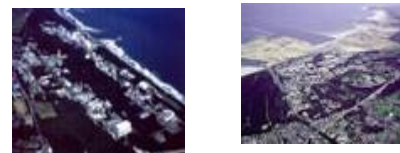
常陽、照射後試験施設等によるFBRサイクル技術開発を実施、革新的原子炉や原子力の多様な利用に関する研究開発を実施



RI\*

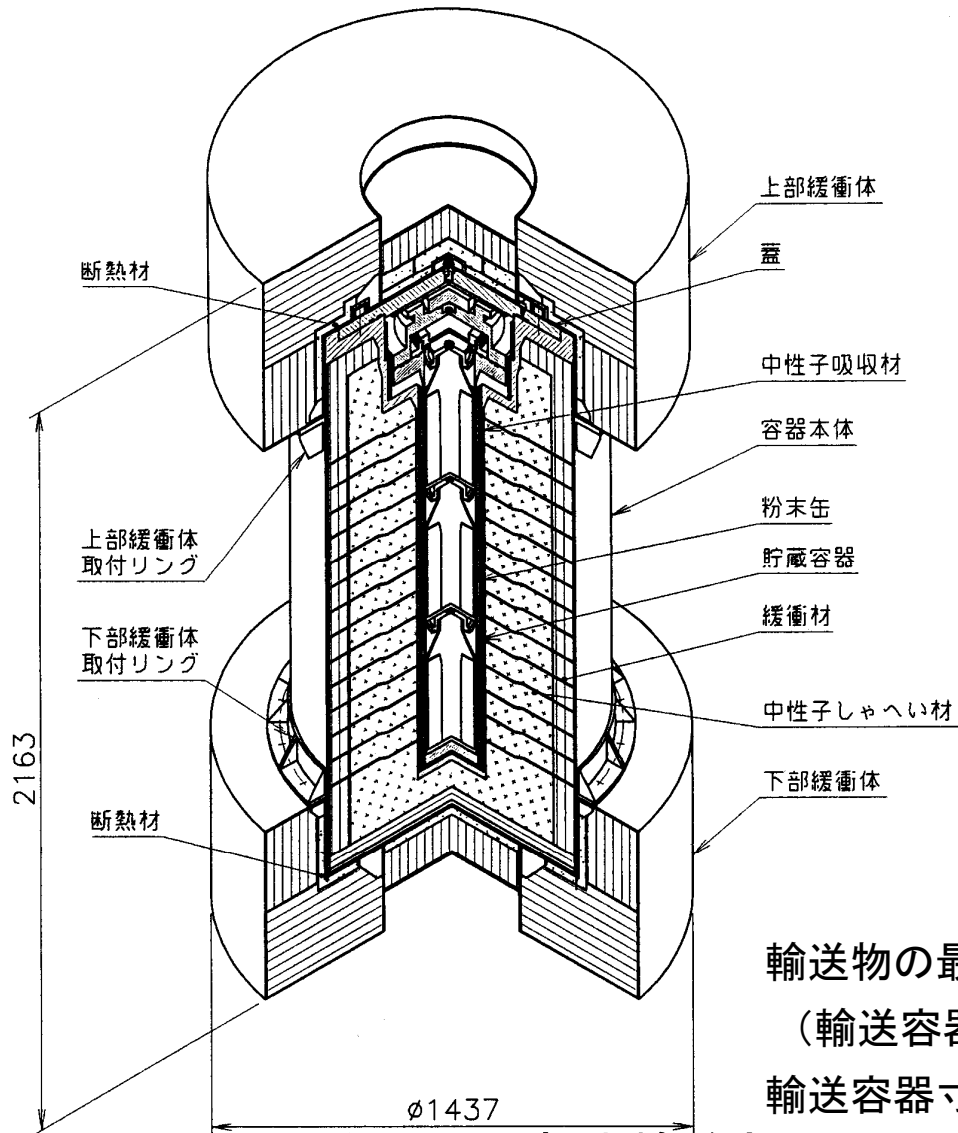
## 東海地区

安全研究、原子力基礎・基盤研究の推進、中性子利用研究の推進、高レベル放射性廃棄物処分研究、FBR燃料加工開発、軽水炉再処理技術開発、研修事業を実施



(RI協会)  
RI\*

\*:製造・頒布-民間



六ヶ所再処理MOX粉末輸送容器

輸送物の最大重量: 4,010kg

(輸送容器: 3,750kg)

輸送容器寸法: φ約1,440mm、H約2,160mm

### 容器の概要

主な仕様	
燃料タイプ	8X8、9X9MOX燃料集合体 (BWR用燃料)
収納体数	12体
発熱量	3.8kw以下

寸法	
全長	5.0m(本体) 6.1m(本体+衝撃吸収体)
直径	1.2m(本体) 2.4m(衝撃吸収体)

重量	
輸送容器	約18 t
燃料体(F/H含む)	約 5t (12体分)
総重量	約23 t

東京電力

Legal Notice: This documentation includes technical knowledge and secret information that belong to TEPCO and our licensees. Therefore, it shall not be disclosed to any third parties. In regard, we do not use for any purpose other than that accorded by TEPCO.

(参考) JMOX輸送容器

## 使用済燃料等多目的運搬船の確保

- 平成18年以降のふげんSF輸送手段と原子力機構の将来的な海上輸送における輸送船を電気事業者、原燃輸送(株)の協力を得て確保。



仕様（六栄丸クラス）

主要寸法全長約100m、全幅約16.5m

載貨重量約3,000トン、最大積載量約5,000トン

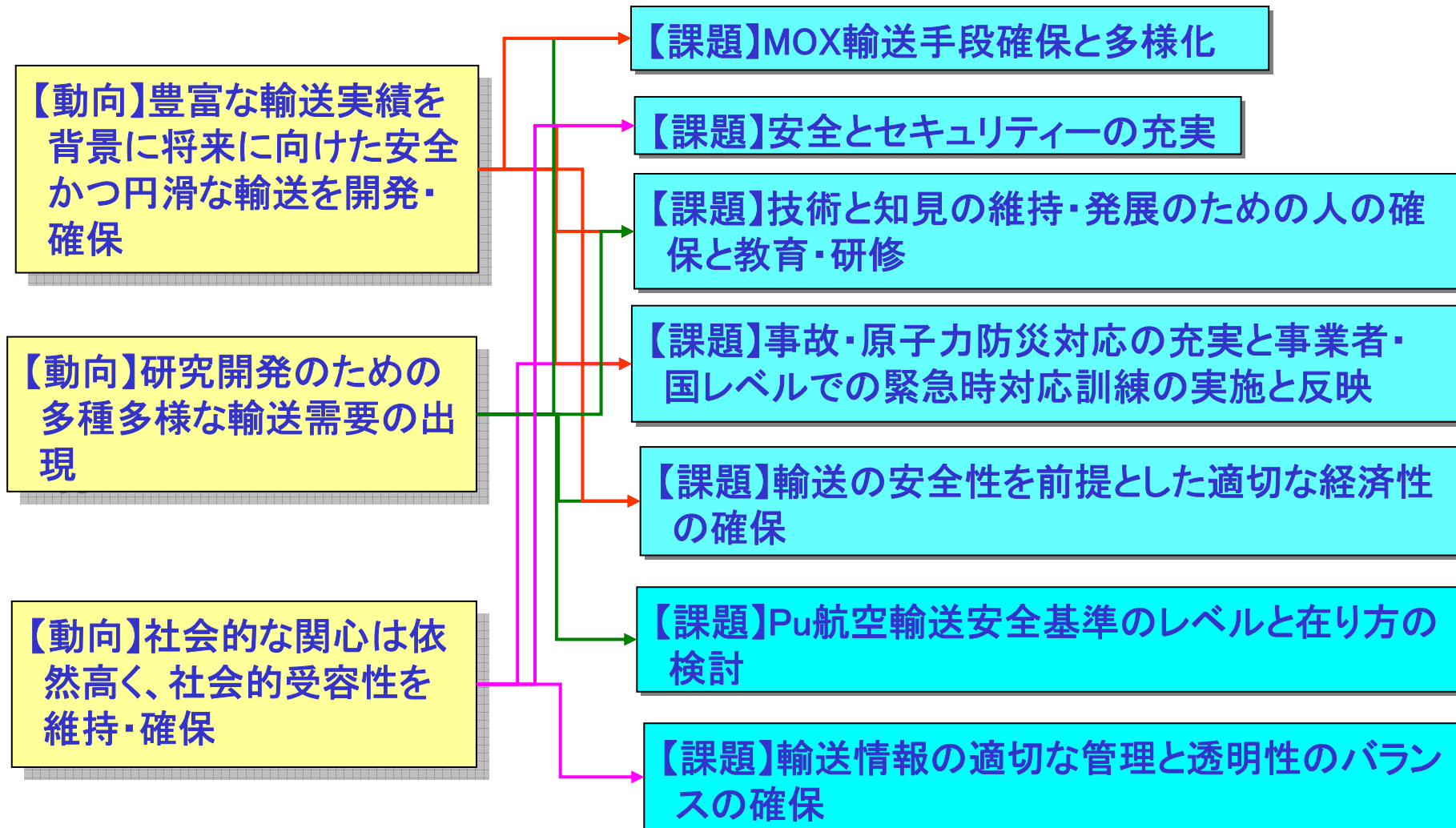
貨物積載個数

大型輸送容器12基分、20ftコンテナ9基分

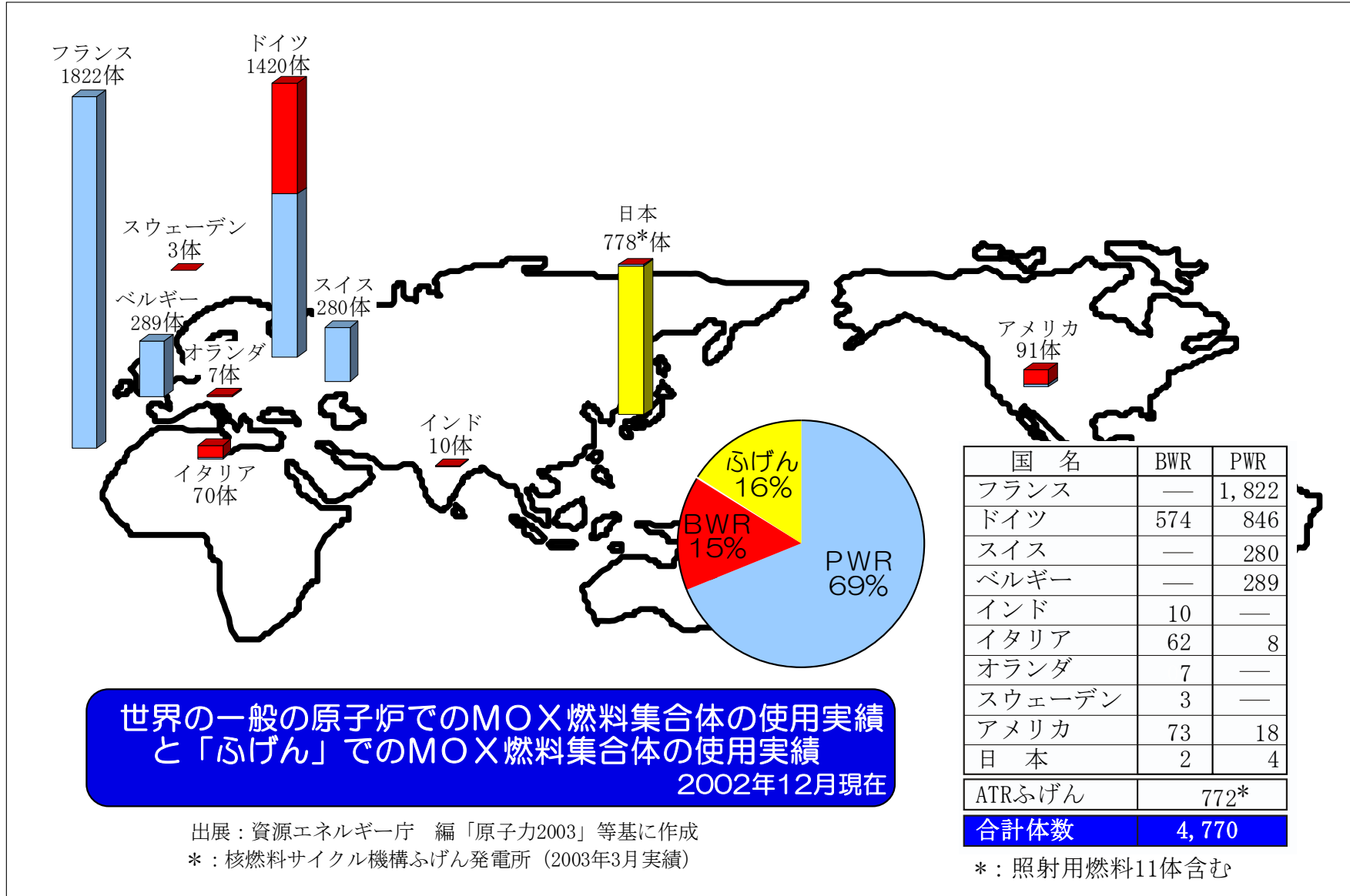
写真は、六栄丸(原燃輸送HPより)



我が国がこれから目指す高速炉でのMOXの利用に向けて、MOX輸送における動向と今後取り組んでいくべき課題についての私見

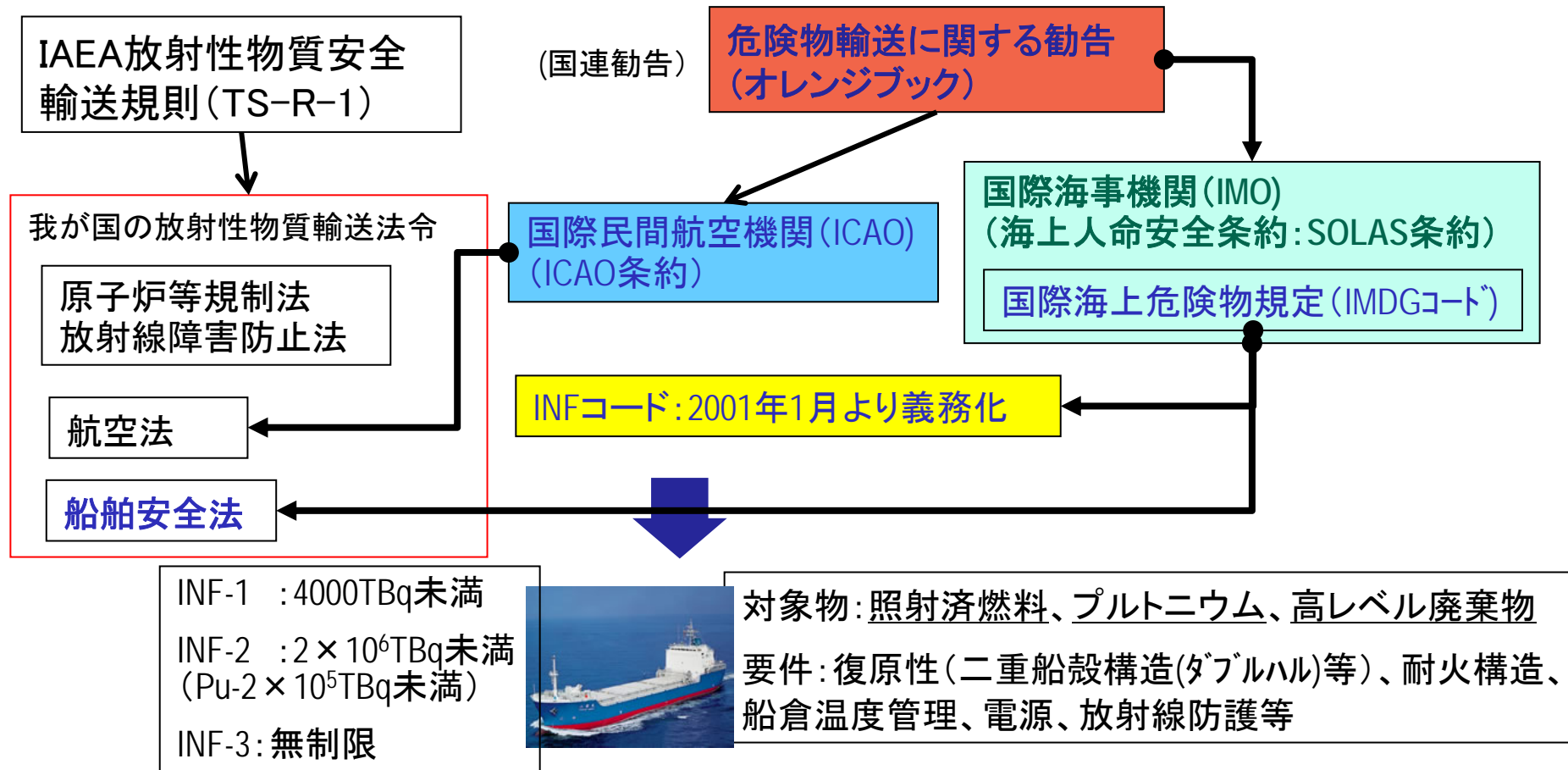


# 資料



照射済核燃料等の国際海上安全輸送規則(INFコード) :

我が国の使用済燃料運搬船に関する厳しい構造基準を国際海事機関に提案したものが国際的に採用されたもの。





## 【経緯】

### ・昭和59年、米国とのPu航空輸送容器開発共同研究を開始

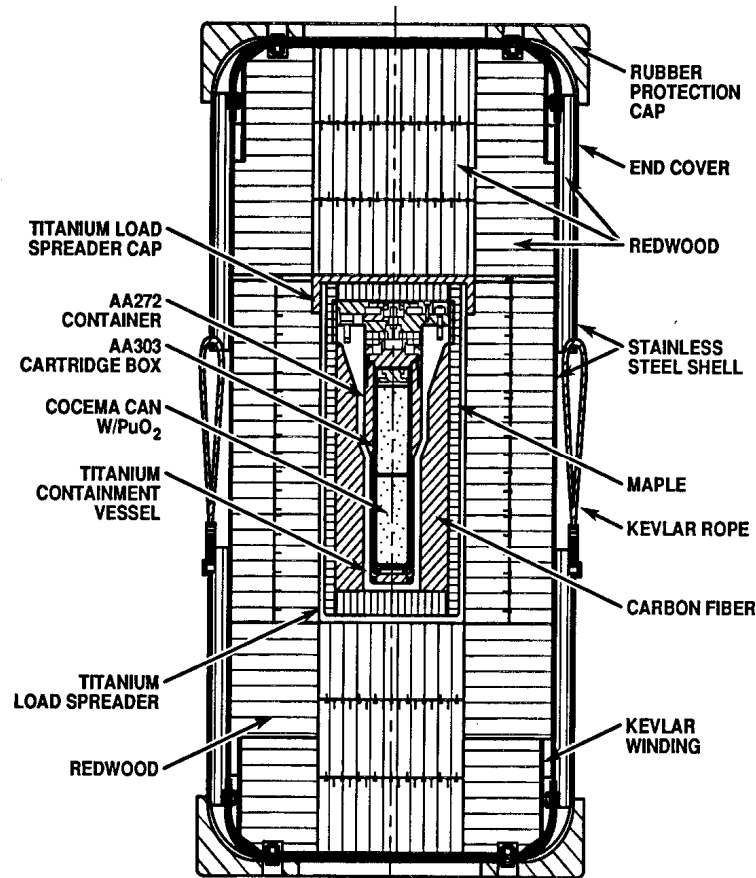
晴新丸によるプルトニウム海上輸送実施を決定した際に、次回以降は航空輸送を目指すこととした。(NUREG-0360基準を目標)

### ・昭和62年12月、マコウスキー修正条項成立

米国上院Murkowski議員が別法案に追加提案。『NRCが米国議会に対し、プルトニウムの輸送される容器が安全であるとの確認をなされない限り、米国の領空を通過して、外国から外国へ航空機によっていかなる形態のプルトニウムも輸送してはならない。』

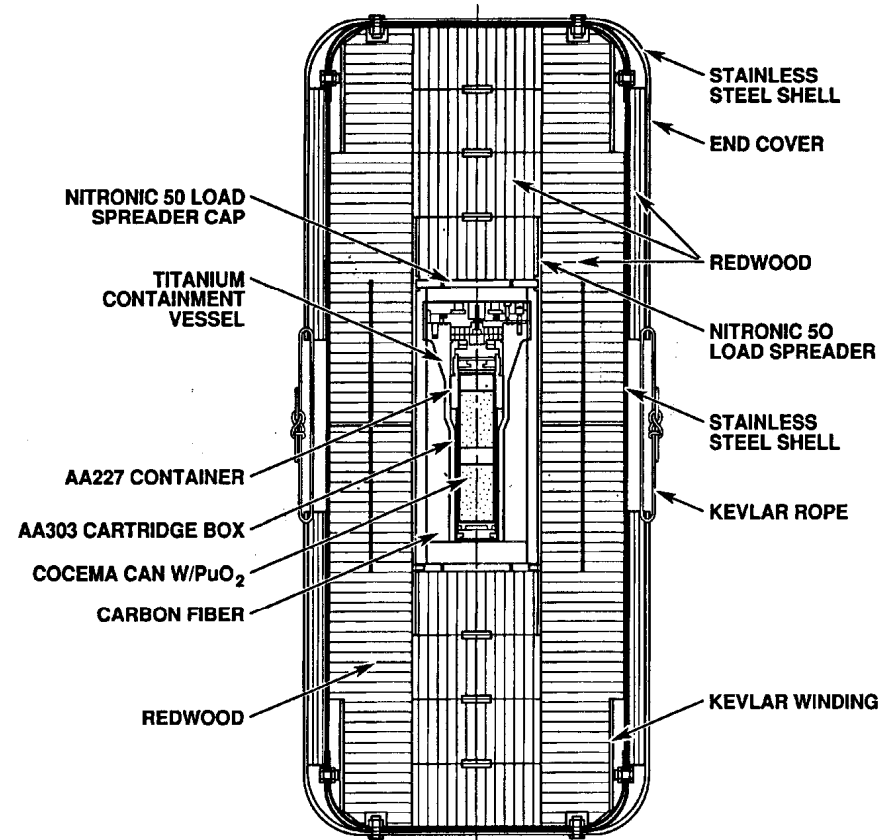
### ・昭和63年10月18日サイドレター(ケネディー大使→遠藤審議官)

『成型加工された混合酸化物(MOX)燃料棒もしくは燃料集合体を除くプルトニウムの修正後の指針による海上輸送は、米国の空域を通過する航空輸送に適切な新型容器が開発され、かつ適用される法に従って米国原子力規制委員会によって、その目的に安全であると認可されていない場合にのみ利用される。』



直径	1.2 m
長さ	2.3 m
重量	2,551 kg

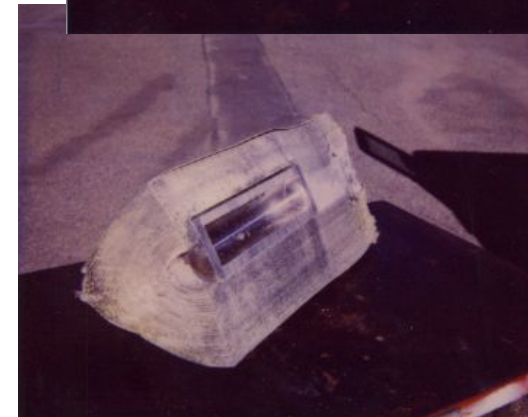
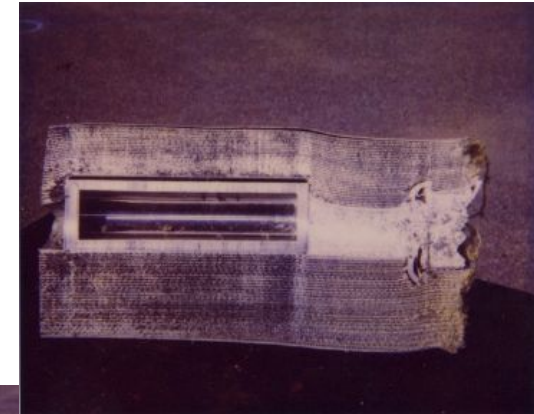
JNC 共通輸送物1型 (Kobe)



直径	1.16 m
長さ	2.6 m
重量	2,830 kg

JNC 共通輸送物2型 (JSW)

# 282m/s衝撃試験の様子





コンテナの固縛装置及び輸送物を模擬した1/5スケールモデル



衝撃試験で用いたターゲット







# Pu航空輸送容器開発の現状



1. マコウスキー基準に基づく高速度衝撃試験(282m/s)等実施
  - ・4基の原型容器に対して衝撃、貫通、引裂、及び火災試験をSNL施設で実施。
  - ・SNLの開発した穴開きアルミ板とアラミド繊維を緩衝材に用いた1/2スケールモデル輸送容器では良好な結果が得られた。
2. すべての試験が成功裏に実施
  - ・NUREG-0360基準及びマコウスキー基準に対するプルトニウム航空輸送容器開発の技術的見通しが得られた。



# プルトニウム航空輸送容器開発



年	1984-1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
基準	NUREG-0360 基準 (衝撃速度: 129m/s)							マコウスキー基準 (衝撃速度: 282m/s)								
Battele	PAT-3 開発															
DOE/SNL	試験施設の提供		NUREG-0360 による試験	改良設計	輸送容器衝撃試験	航空機機体構造による緩衝効果の検証	航空機機体構造による緩衝効果の検証	マコウスキー基準 (ワーストケースの条件) に基づく輸送容器の改良設計及び開発								
NRC		マコウスキー条件に基づく技術基準の策定														
JNC (PNC)		NUREG-0360 試験用輸送容器の製作 (4基)														
備考	▲ 「晴新丸」による仏国から日本へのプルトニウム海上輸送 ▲ マコウスキー法案の成立						▲ 「あかつき丸」による仏国から日本へのプルトニウム海上輸送									

輸送従事者は…



事故が発生した場合の対応方法を記載した書類の携行

輸送隊は…



放射線測定器、消火器、防護服などの応急措置に必要な資器材の携行

運行責任者は…



事故が発生した場合、直ちに最寄りの警察署、消防署に通報、応急措置、輸送実施本部への通報  
二次災害防止のため、事故現場に立入制限区域を設定、関係者以外の者が近付かないように誘導

## 輸送計画書の連絡体制例

