

# 乾式キャスク貯蔵に関する世界的動向 -長期貯蔵-

一般財団法人 電力中央研究所  
三枝利有、亘 真澄

原子力委員会(臨時会)

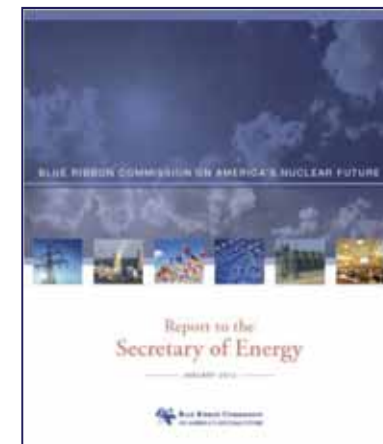
平成25年10月17日

# 構 成

---

1. 米国の動向
2. ドイツの動向
3. OECDの動向
4. IAEAの動向
5. PATRAMでのトピックス

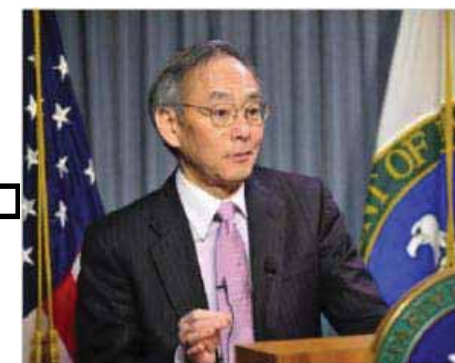
# 1.1 使用済燃料をめぐる米国の状況



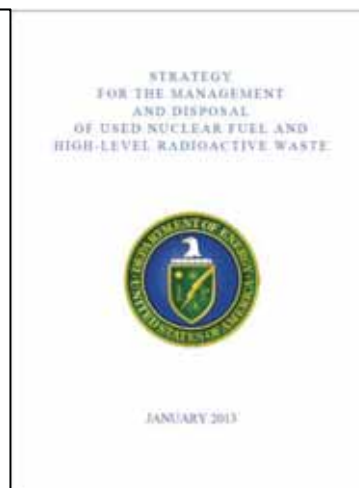
ユッカマウンテン計画 中止

Blue Ribbon Commission (BRC)  
での検討 (2010.1-2012.1)

BRCの報告書



DOEでの検討  
(2012.1-2013.1)



DOEの報告書



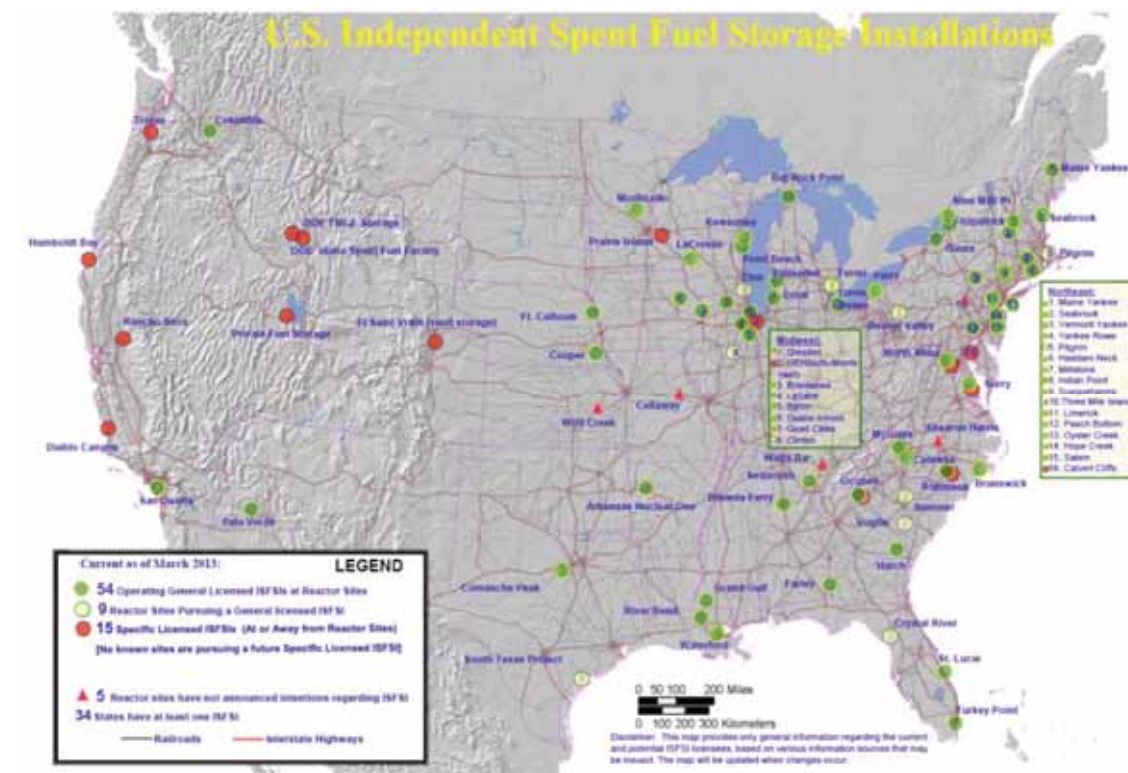
- 2021 中間貯蔵施設の運開 (Pilot-scale)
- 2025 大容量中間貯蔵施設の運開
- 2026 処分施設の立地場所選定
- 2048 処分施設の運開



計画遂行の  
ための検討・  
研究・開発

“原子炉が撤去され、乾式貯蔵施設のみが残されたサイトから使用済燃料を搬出”の議論

# 米国の使用済燃料乾式貯蔵の現状



- 2013年3月時点での貯蔵施設  
General License:54  
Specific License:15
- 2013-2014年で申請が予想される貯蔵施設  
General License:8
- 最近の申請は、全てコンクリートキャスク(横型サイロも含む)
- キャスク設計の傾向:大容量化
- 初期の貯蔵施設の許認可では、貯蔵期間が20年であったため、すでに、ライセンス更新を行った施設がある。



Holtec社製



NAC社製

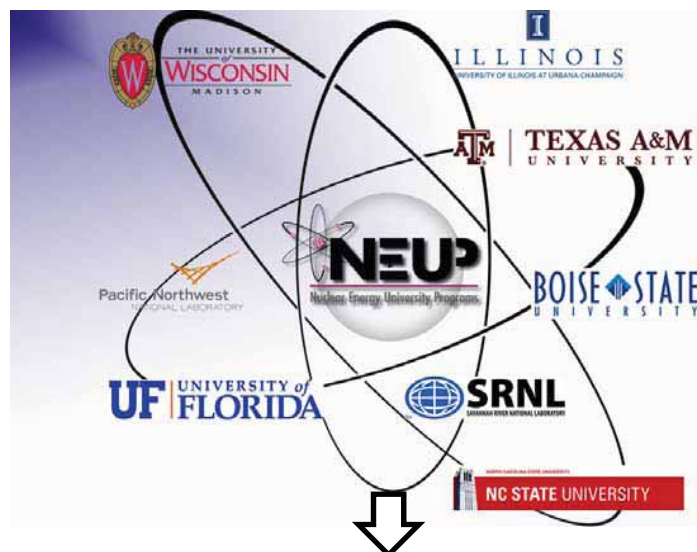


AREVA/TN Inc社製

Surry:1986.7→更新済  
H.B.Robinson:1986.8→更新済  
Oconee:1990.1→更新済  
Calvert Cliffs:1992.11→申請中  
Palisades:1993.5→申請中  
Prairie Island:1993.10→申請中  
Point Beach:1996.5→準備中？

## 1.2 使用済燃料貯蔵の研究(ESCP他)

### Nuclear Energy University Programs(DOE)



### ESCP(DOE)



### NRC

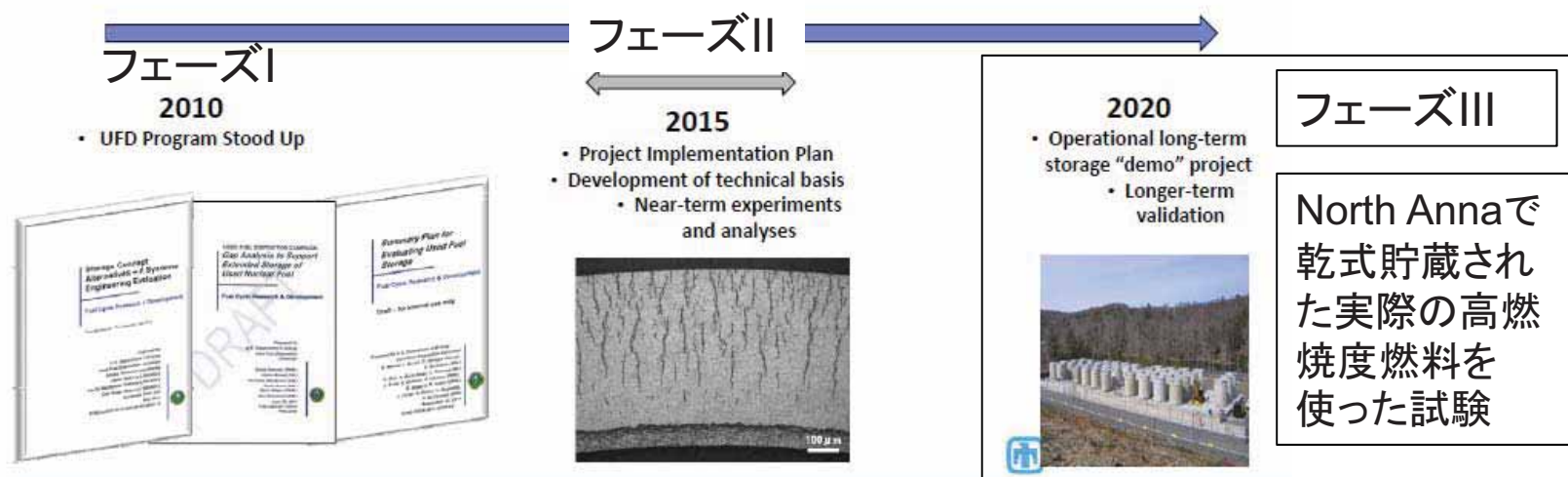
ORNL  
ANL  
SwRI

- ①100年以上の中間貯蔵のための材料評価(U of Michigan) \$931,601 (2010～)
- ②使用済燃料貯蔵用キャニスタ材料の寿命評価(MIT) \$899,826 (2011～)
- ③乾燥および搬送中の使用済燃料被覆管温度予測のためのシミュレーション開発およびベンチマーク試験(U of Nevada-Reco)\$745,000 (2012～)
- ④使用済燃料および放射性廃棄物への放射線および熱的影響(U of Tennessee) (2012～)
- ⑤乾式キャスク構造の確率論的マルチハザード影響評価(U of Houston)\$865,000 (2012～)
- ⑥使用済燃料長期貯蔵システムのための超耐損傷性および自己検知性を持つコンクリート材料 (U of Houston) \$800,000 (2012～)
- ⑦乾式キャスク貯蔵におけるアルカリ骨材反応による損傷の非線形超音波診断および予測(Northwestern U)\$885,000 (2012～)
- ⑧使用済燃料プールおよび乾式キャスクの自然対流に関する実証試験 (Utah St U)\$690,000 (2012～)
- ⑨長期間の乾式貯蔵キャスク貯蔵における耐震性能(U of Utah)\$873,319 (2012～)

# ESCP(Extended Storage Collaboration Program)の概要

## 目 的

- ・長期貯蔵中の使用済燃料貯蔵システムの健全性実証
- ・長期貯蔵後の回収・輸送の技術開発
- ・高燃焼度燃料の輸送技術開発



➤EPRIが幹事

➤6つのSubcommittee

- ① Fuel/Internal    ② Concrete    ③ CISCC (Chloride Induced Stress Corrosion Cracking)    ④ NDE    ⑤ Demo    ⑥ International    ⑦ Aging Management

➤年2回程度(5月、11月頃)、全体会議が行われる。

# ESCP(フェーズI):ギャップ解析による課題の洗い出し・優先順位付け 2012.4

Gap	Priority	Gap	Priority
(輸送・貯蔵中の燃料被覆管の)温度分布	1	中性子ポイズン - 熱劣化	7
(輸送・貯蔵中の燃料被覆管の)応力分布	1	減速材の遮断	8
モニタリング - 外部	2	被覆管 - 水素遅れ割れ	9
溶接キャニスタ - 大気腐食	2	アイダホ国立研での燃料検査	10
燃料移送オプション	3	被覆管 - クリープ	11
モニタリング - 内部	4	燃料集合体の構造 - 応力腐食割れ	11
溶接キャニスタ - 水溶液腐食	5	中性子ポイズン - 脆化	11
ボルト締めキャスク - シールおよびボルトの疲労	5	被覆管 - 照射損傷の回復	12
ボルト締めキャスク - 大気腐食	5	被覆管 - 酸化	13
ボルト締めキャスク - 水溶液腐食	5	中性子ポイズン - クリープ	13
乾燥問題	6	中性子ポイズン - 腐食	13
バーンアップクレジット	7	オーバーパック - 凍結融解	14
被覆管 - 水素化物再配向	7	オーバーパック - 鉄筋腐食	14

Imminent need

Immediate to facilitate demonstration early start

Near-term High or Very High

Long-term High

Near-term Medium or Medium High

Long-term Medium

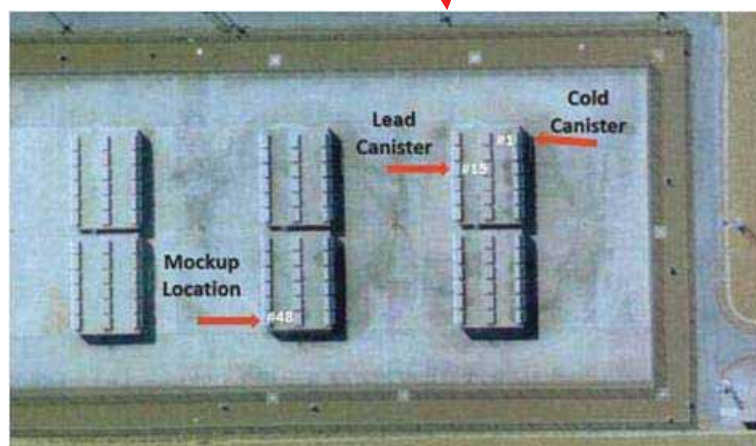


Proudly Operated by Battelle Since 1965

# 1.3 ライセンス更新のための実貯蔵現場検証 (Calvert Cliffs、メリーランド州)



キャニスタ



支持架台

## 2. ドイツの動向

---

2.1 ドイツの乾式キャスク貯蔵

2.2 使用済燃料の長期健全性研究

2.3 貯蔵施設への定期安全レビューの導入

## 2.1 ドイツの乾式キャスク貯蔵



Wet Storage in NPP Pools



CASTOR® V cask design by GNS  
(source: GNS)

Since 1992 .....

Dry Storage in Casks at  
Centralized Interim Storages



2002年原子力法改訂:  
SFの再処理への輸送禁止、SFは直接処分のみ

Since 2002 .....

Dry Storage in Casks at  
On-Site Interim Storages  
at all NPP Sites

貯蔵建屋は、悪天候や飛行機  
墜落等からキャスクを保護



貯蔵期間は40年に限定されている(行政上の理由) !  
“Guideline for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-  
generating Waste- revised version of 29 November 2012”  
ESK, Germany.

# ドイツの敷地内外貯蔵施設



Local Storage  
Facilities outside  
Reactor Sites

On-Site Interim  
Storage Facilities

Overall  
980 Casks  
(Dec. 2012)

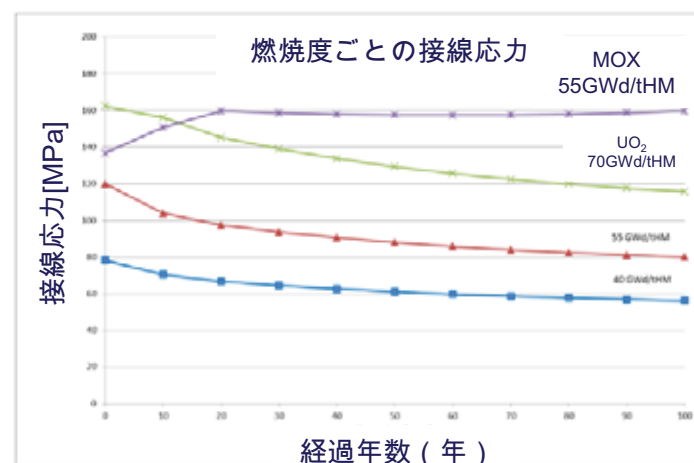
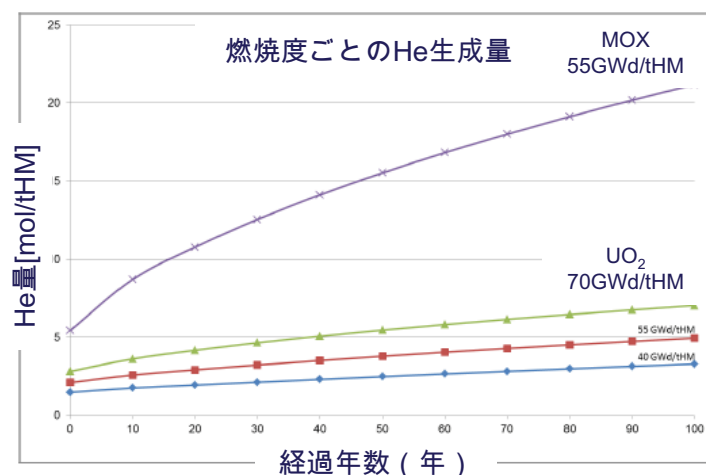
Ahaus (1992)	6 LWR casks 305 THTR casks 18 MTR casks
Gorleben (1995)	5 LWR casks 108 HAW casks

Greifswald ZLN (1999)	65 LWR casks 4 KNK casks 5 HAW casks
Jülich (1993)	152 AVR casks
Biblis (2006)	51 LWR casks
Brokdorf (2007)	16 LWR casks
Brunsbüttel (2006)	9 LWR casks
Grafenrheinfeld (2006)	16 LWR casks
Grohnde (2006)	18 LWR casks
Gundremmingen (2006)	43 LWR casks
Isar (2007)	22 LWR casks
Krümmel (2006)	19 LWR casks
Lingen/Emsland (2002)	33 LWR casks
Neckarwestheim (2006)	41 LWR casks
Philippsburg (2007)	36 LWR casks
Unterweser (2007)	8 LWR casks
Obrigheim	Not licensed so far

## 2.2 使用済燃料の長期健全性研究

### FPとHeガス生成量計算結果

燃焼度の上昇につれてHe生成量も上昇する(特にMOX SFで！)。



- UO<sub>2</sub> SFの温度低下が支配的で、貯蔵中の内圧・被覆管応力も低下。
- MOX SFの温度低下は遅く、Heガスの蓄積により、貯蔵中の内圧・被覆管応力は上昇するが、20年後は、ほぼ一定。
- 一方、仏CEAの評価では、生成されるHeは燃料ペレット内部に留まり、被覆管内の圧力上昇は無視できるとしている。

## 2.3 貯蔵施設への定期安全レビューの導入

### ◆必要性

- 使用済燃料貯蔵施設の増加(17施設)と貯蔵期間の長期化見通し
- これまでの貯蔵期間中に起きた変化(意図的・非意図的の両方)  
 施設内、運営組織、法的枠組み、施設近隣、等の変化があった。その結果、施設等の改善、当該貯蔵施設及び他の貯蔵施設における運転経験が及ぼすもの、経年劣化による施設全体の安全性に好ましくない顛末。
- 10年ごとのPSRにより、施設全体の安全性への損傷を特定し改善する。

### ◆法的枠組み

- ドイツ廃棄物対策委員会(ESK)及び環境省(BMU)は、「中間貯蔵施設のPSR実施指針勧告案」を2010年に取りまとめた。本勧告の施行前に2つの使用済燃料貯蔵施設に試験的に適用し、勧告案を改善する事とした。
- 試行的PSRの対象施設:ゴアレーベン中間貯蔵施設、リンゲン原子力発電所内貯蔵施設

### 3. OECDの動向

ワークショップ (Safety of Long Term Interim Storage Facilities, Munich, 21-23 May 2013。16ヶ国・機関から約100名参加。) の勧告

1. 「長期貯蔵」は、使用済燃料の「再処理」か「処分」までの中間工程であり、「長期貯蔵」を政策とすべきではない。
2. 長期貯蔵技術として、高燃焼度やMOX使用済燃料の挙動、キャスクの長期健全性等の試験研究成果を整備すべき。
3. 破損燃料の長期貯蔵技術も研究すべき。
4. 「長期貯蔵」に伴う非技術的な側面(知見管理、記録維持、人員訓練・計画等)にも配慮すべき。

## 4. IAEAの動向

---

4.1 IAEAによる貯蔵の指針、技術文書等の作成

4.2 IAEAによる国際共同研究

4.3 輸送・貯蔵兼用キャスクのセーフティケースに関するワークショップ

## 4.1 IAEAによる貯蔵の指針、技術文書の作成

1	No.SSG-15 (安全指針)(2012) (改訂検討中) 使用済燃料貯蔵
2	No.NF-X.X 技術文書(印刷中) 使用済燃料管理における潜在的境界問題
3	No. NS-X.X 技術文書 (印刷中) 輸送・貯蔵兼用キャスクのセーフティケース指針
4	No. NF-X.X 技術文書(作成中) 再処理又は処分への輸送までの使用済燃料貯蔵期間の延長-不確実な貯蔵期間の課題-

# IAEAの動向-米国の動向との関係-

## -電中研の整理-

		IAEA (NE): 再処理・処分への輸送までの使用済燃料貯蔵期間延長問題			
<u>IAEA (NS)</u>		1. 安全原理	<u>米国の長期貯蔵共同研究(ESCP)</u>		
1. 安全貯蔵指針 (SSG-15) 改訂	<u>IAEA(NE)</u> 貯蔵オペ ション	2. 設計・許認可 更新			
2. 輸送・貯蔵兼用 カスクのセーフ ティケース		3. 経年管理	経年劣化の理解	1. ギャップ解析	
		4. 規制	材料劣化	2. 実験/解析	<u>IAEA (NE)</u> SPAR III
				3. 実証試験	<u>IAEA (NE)</u> 国 際共同研究
			予防		
			監視		
			検査		
NE : 原子力部			劣化軽減		
NS : 原子力安全部		5. 政策	維持管理		
		6. 公衆の信頼			

## 福島事故後、No.SSG-15（安全指針）(2012)

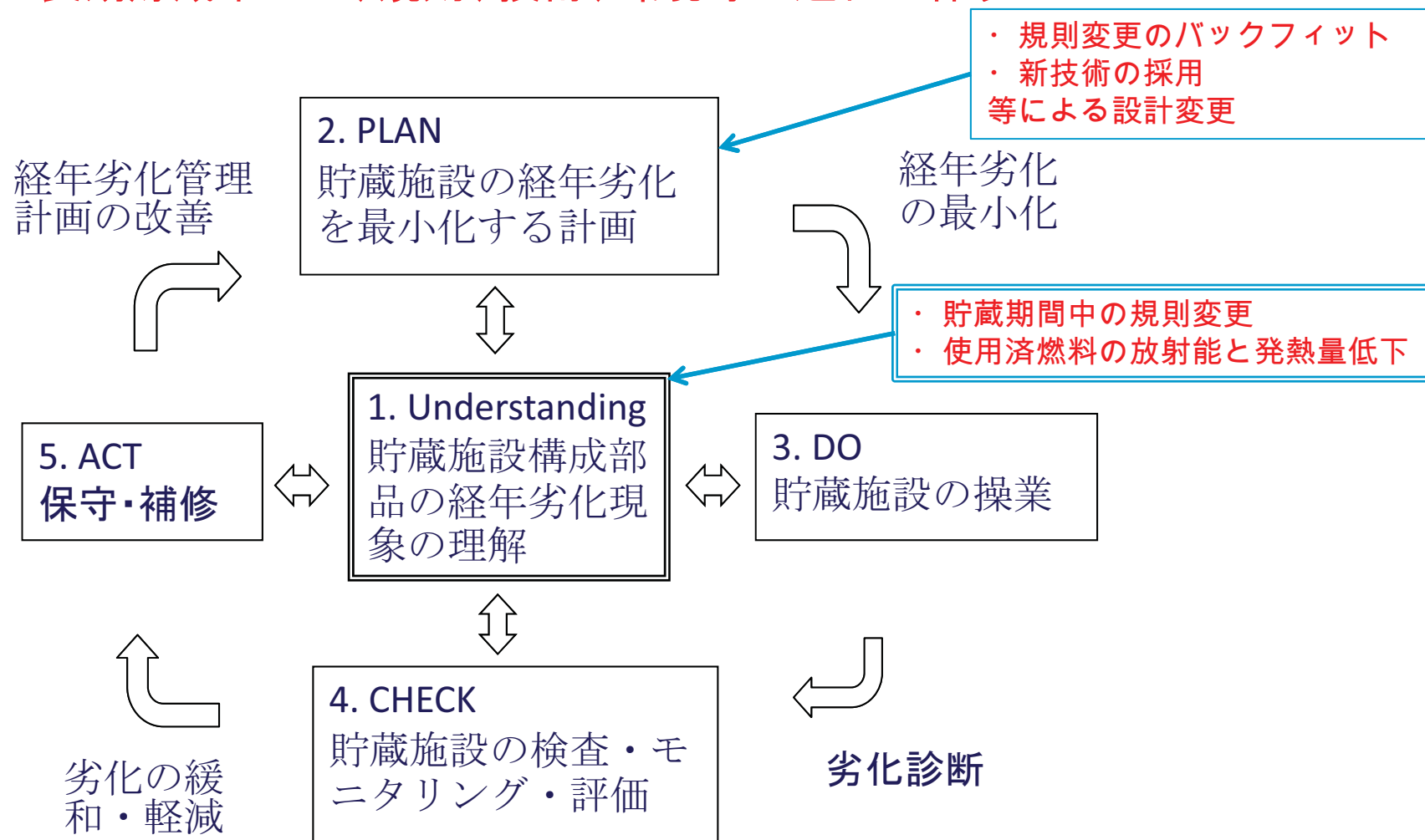
### Storage of Nuclear Fuel改訂のコンサルタント会合 からの勧告

(Report by Y. Kumano at WASSC, Nov.26-27, 2012)

1. 重要な安全機能のモニタリング機器(para. 6.61)は、設計基準事故を超える事象後に利用・稼働することを、施設運転者は確認すべき。
2. 運転中の安全規制(para 6.98)を強化し、起因事象の組み合わせを考慮する。
3. SSG 15に追加的な項目を作り、設計基準事故を超える事象への対処を記述する。

# 使用済燃料貯蔵の経年劣化管理の手法

—— 長期貯蔵中には、規則、技術、環境等の進化が伴う ——



## 4.2 IAEAによる国際共同研究

### a. SPAR III: 使用済燃料の健全性評価研究

Country	Organization
France	TN Int.
Germany	GNS
Korea	KAERI
Hungary	TS ENERCOM
Japan	JNES, 電中研
UK	Sellafield
USA	NRC, EPRI, PNNL

### b. 使用済燃料及び貯蔵施設の長期健全性実証研究

Country	Organization
France	TN Int
Germany	BAM
Japan	原電、電中研
Poland	NCNR
Spain	CSN
UK	NNL
USA	NRC, EPRI

A. BEVILACQUA, CRP ON DEMONSTRATING PERFORMANCE OF SPENT FUEL AND RELATED STORAGE SYSTEMS BEYOND THE LONG TERM, Munich, Germany, 21 – 23 May 2013.

## 4.3 IAEA使用済燃料の輸送・貯蔵兼用キャスクのセーフティケース (安全事例)の作成・適用に関する国際ワークショップ

開催期日: 2014年5月19-21日、場所: IAEA本部(ウィーン)

### 1. 背景

- ① IAEAは、「使用済燃料の輸送・貯蔵兼用キャスク(DPC)による輸送・貯蔵のセーフティケースの手引き」(草案)を作成した。セーフティケースは、DPCの安全をサポートする議論と根拠を集めたもの。
- ② 長期間の貯蔵及びその後の輸送要件への適合性を確保するために、セーフティケースにおいて経年劣化管理プログラムを検討することが重要。
- ③ 輸送・貯蔵のセーフティケースの概念は加盟国に浸透していない。

### 2. 目的

輸送・貯蔵の安全事例概念の理解を加盟国が深めることを促す。

### 3. 主なトピックス

- ① 輸送・貯蔵キャスクのセーフティケースの概念と適用方法・例
- ② 輸送キャスクの設計承認と貯蔵許認可との調和
- ③ 敷地内の輸送・貯蔵における試験条件設定の必要性和方策
- ④ 他の貯蔵技術(キャニスタ方式、HLWキャスクなど)への適用
- ⑤ 既存のIAEA規則・指針に対する改訂提案のフォローアップ

## 5. PATRAMでのトピックス

PATRAM (International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials)が、2013年8月に米国で開催され、22ヶ国・機関から約800名が参加した。破損燃料の乾燥・輸送・貯蔵に関する発表があった。

### ①破損燃料のカプセル収納・輸送・貯蔵技術

破損燃料棒のカプセル収納およびキャスクへの収納による、輸送の安全評価が行われている。未臨界・密封設計上、破損燃料カプセルのキャスクへの収納量は限定される。残留水分に起因する水素発生量の評価上、輸送日数が限定される。

### ②破損燃料の乾燥技術

チェルノブイリ原発での破損燃料(22,000体)向けに、強制温風による残留水分の乾燥技術が開発・試験され、様々な欠陥寸法の破損模擬燃料の乾燥に成功した。従来の真空乾燥に比べ、燃料の温度上昇を抑えられる。

# まとめ

- ◆使用済燃料政策は国により事情は異なるものの、長期貯蔵は世界的な傾向であり、情報をフォローしておく必要がある。
- ◆3.11以降、将来のわが国の原子力政策については国において見直し中である。米国等とは事情が異なるものの、貯蔵の長期化・許認可の更新は、わが国でも視野に入れておく必要がある。

# 参考文献

## 1. 米国の動向

- ① UFDC. 2012. Used Nuclear Fuel Storage and Transportation Data Gap Prioritization, FCRD-USED-2012-000109 Draft, PNNL-21360, Prepared for the U.S. DOE Used Fuel Disposition Campaign, Washington, D.C.

## 2. ドイツの動向

- ① H. Voelzke, et al, Safety Aspects of Long-Term Interim Storage of Spent Nuclear Fuel in Germany, OECD/NEA International Workshop on Safety of Long Term Interim Storage Facilities, Munich, Germany, 21 – 23 May 2013.
- ② S. GEUPEL, INTERIM STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL BEFORE FINAL DISPOSAL IN GERMANY–REGULATOR’S VIEW, *ibid.*
- ③ J. NELES, G. SCHMIDT, PERIODIC SAFETY REVIEW IN INTERIM STORAGE FACILITIES - CURRENT REGULATION AND EXPERIENCES IN GERMANY, *ibid.*

## 3. OECDの動向

- ① Workshop Proceedings on Safety of Long Term Interim Storage Facilities, Munich, Germany 21-23 May 2013

## 4. IAEAの動向

- ① A. BEVILACQUA, CHALLENGES ASSOCIATED WITH EXTENDING SPENT FUEL STORAGE UNTIL REPROCESSING OR DISPOSAL, *ibid.*
- ② A. BEVILACQUA, CRP ON DEMONSTRATING PERFORMANCE OF SPENT FUEL AND RELATED STORAGE SYSTEMS BEYOND THE LONG TERM, *ibid.*
- ③ Y. Kumano, Report on the CS meeting on the revision of SSG-15 in light of TEPCO Fukushima Daiichi NPP Accident, IAEA WASSC, 16-17 November, 2012.

## 5. PATRAMでのトピックス

- ① Rick Springman, “Spent Nuclear Fuel Forced Gas Drying Technology”.
- ② Nathalie Allimann, “AREVA Solutions for Transport and Dry Interim Storage of Damaged Fuel”.