

高レベル放射性廃棄物地層処分 の技術的問題点

－炭素鋼オーバーパック（人工バリア）は
千年もつのか？－

井野博満

（原子力市民委員会アドバイザー）

2023年12月14日委員会での報告

今日の報告を頼まれたきっかけ

- 日本学会議高レベル放射性廃棄物の処分に関する検討委員会(第4回) (2011年2月14日)で講演

「高レベル放射性廃棄物の処分に関する 検討委員会」設置の経緯

- 原子力委員会から日本学術会議への依頼
- 国の原子力政策の要である原子力委員会では、「国民が信頼できる科学的知見にもとづく情報の提供等が行われること」の重要性を指摘してきており、いわゆる原子力政策や原子力事業に携わる組織ではなく、第三者的で独立性の高い学術的な機関による意見を求める必要性を表明してきた。
- 本委員会は、こうした原子力委員会の要請を受けて日本学術会議のもとに設置された
- ****
- 昨今、「学術会議は国の重要な政策課題に取り組んでいない」、「改革すべきだ」という攻撃がなされている。政府の意にそわない「第三者的で独立性の高い学術的な機関」はいないというのが本音
- 学術会議改正法が提案され、存亡の危機にある

日本学術会議、高レベル放射性廃棄物の処分について原子力委員会に回答(2012.09.12)

提言したのは、以下の6つ

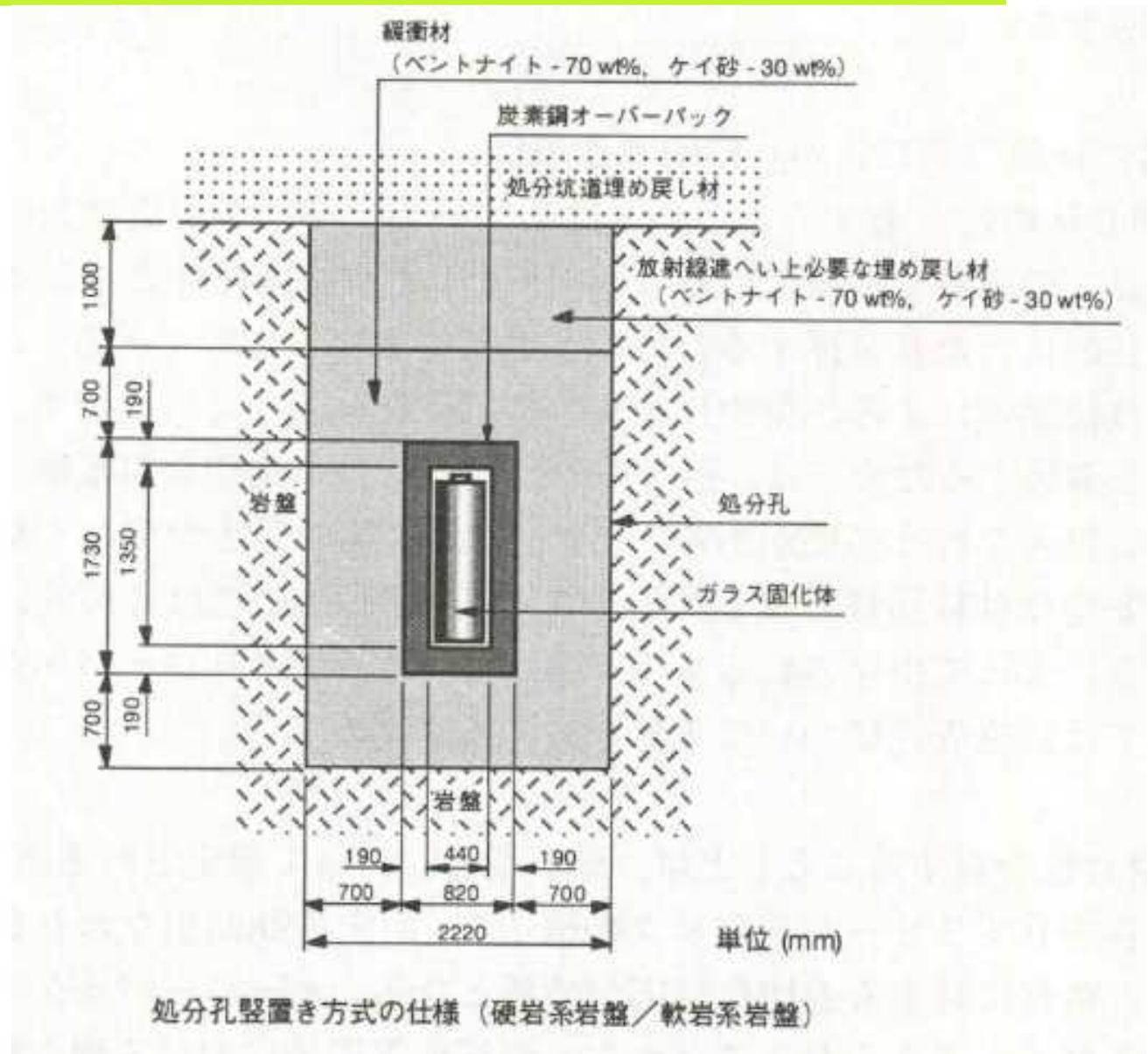
- 1) 高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策の抜本的見直し、
- 2) 科学・技術的能力の限界の認識と科学的自律性の確保、
- 3) 暫定保管および総量管理を柱とした政策枠組みの再構築、
- 4) 負担の公平性に対する説得力ある政策決定手続きの必要性、
- 5) 討論の場の設置による多段階合意形成の手続きの必要性、
- 6) 問題解決には長期的な粘り強い取組みが必要であることへの認識。

炭素鋼オーバーパックの 技術的問題点

炭素鋼オーバーパックスの仕様

人工バリアの仕様例

出典：核燃料サイクル開発機構「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術」
図 4.1-1



炭素鋼を選ぶ理由

- 腐食(さび)が最大の問題なのに、なぜもっとも腐食しやすい炭素鋼を選ぶのか？
- 鋼の分類
 - 炭素鋼(Fe-Cの合金)
 - 低合金鋼(Fe-CにCr, Ni, Moなどを1%程度添加)
 - 高合金鋼(ステンレス鋼Fe-18%Ni-8%Crなど)
- 炭素鋼は安い。腐食の形態が均一な全面腐食。局所腐食(孔食やひび割れなど)を起こしにくい

腐食は金属材料学の中で もっとも未解明な分野

現象が複雑で固体物理学や量子化学の手が届かず、経験(実験)に依存するところが大

- **環境中のさまざまな要因**(水分、酸素濃度、溶解元素など)によって現象が多様に変化する
- **合金中の微量元素の存在形態**(鉱石や製造履歴に依存)によって現象が多様に変化する

炭素鋼オーバーパックの厚さは どう決められたか

(『地層処分の技術的信頼性-第2次取りまとめ-』
1999年11月による)

- ガラス固化体を肉厚19cmの円筒で包む
- 放射線遮へい厚さ15cm＋腐食代4cm
- 1,000年以上ガラス固化体の閉じ込めが期待できる

表 4.1.1-11 炭素鋼オーバーパックスの厚さ

	硬岩系岩盤		軟岩系岩盤	
	蓋部	円筒部	蓋部	円筒部
① 耐圧厚さ	110 mm	50 mm	80 mm	30 mm
② 放射線遮へい厚さ	150 mm			
③ 腐食代	40 mm			
オーバーパックス厚さ $\max(①, ②) + ③$	190 mm			

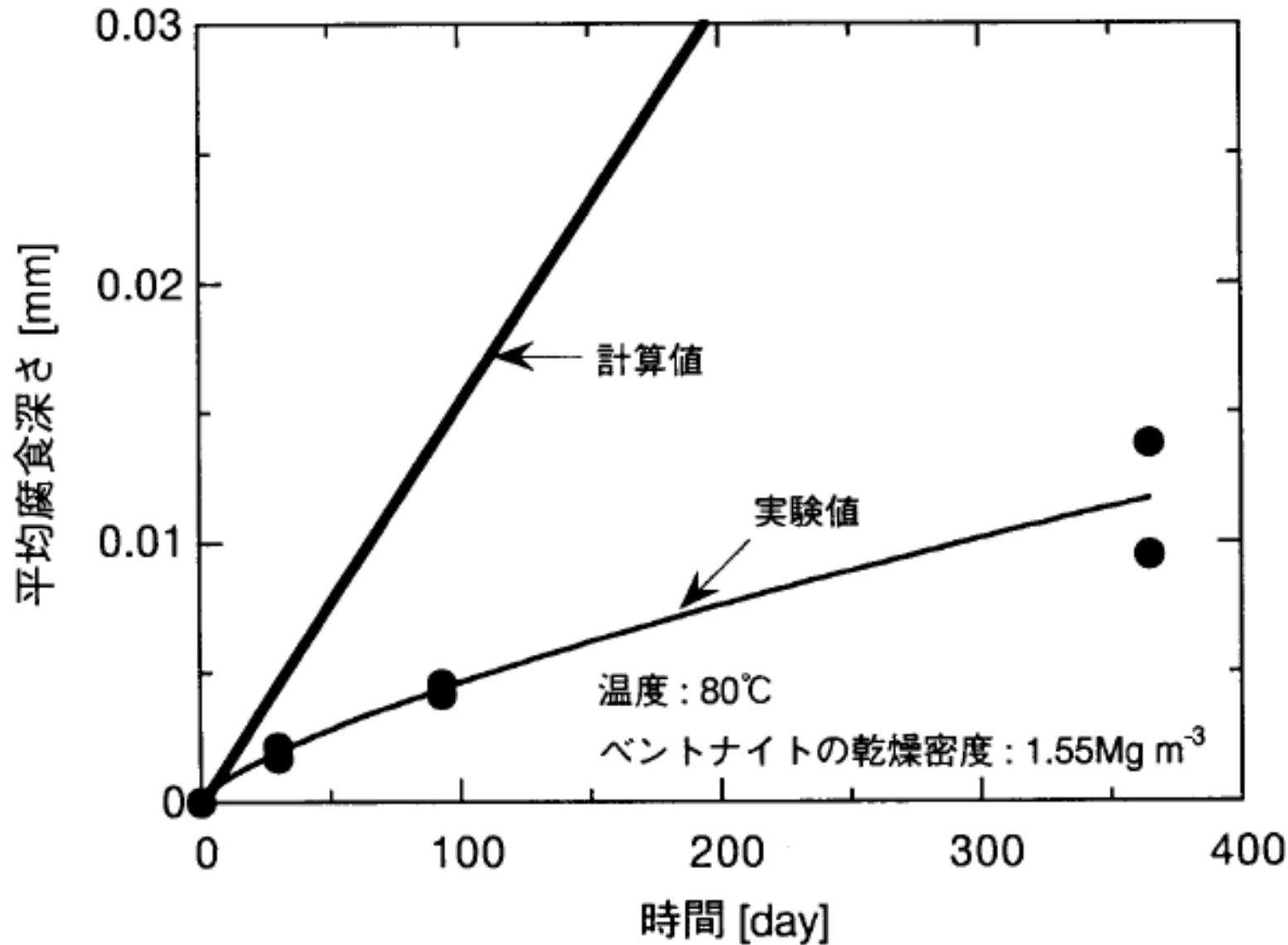
出典：核燃料サイクル開発機構「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術」
表4.1.1-11

腐食代40mmという数値の根拠は？

- 地層処分環境下では次のような条件が満たされているとしている
 - 緩衝材のベントナイトで覆われた環境では、局部腐食でなく、全面腐食になる
 - 地下環境は酸素の乏しい還元性環境
 - 水素脆化は起こさない

均一腐食モデルで計算

- 温度に依存するアーレニウス型として、平均腐食速度 $K[\text{mm}/\text{y}]$ を計算
- $K=22.8\exp(-1.72 \times 10^4 / RT)$ (T は絶対温度)
1,000年間の腐食深さは、
 $3.87(90^\circ\text{C}, 50\text{年}) + 13.88(70^\circ\text{C}, 250\text{年})$
 $+ 31.98(60^\circ\text{C}, 700\text{年}) = 49.7\text{mm}$ (約5cm)
- しかし、実際は被膜による抑制が働くので、実験では腐食速度は5分の1以下になる。



モデルによる平均腐食深さの計算結果と実験結果との比較

出典：核燃料サイクル開発機構「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－ 分冊2 地層処分の工学技術」 図4.1.1-10

腐食速度推定の問題点

- 皮膜で抑制されるとしている。しかし、実験は1年までしかなく、しかもバラツキ大
- 数百年にわたってぶ厚くなった皮膜が同じ状態に保たれるか？
- 途中で条件が変化し、局部腐食によって孔食やすき間腐食が起これば、腐食が一気に進む

腐食速度推定の問題点（続き）

- 腐食生成物（マグネタイト）が腐食速度を増やす可能性が指摘されている（児島・辻川）。報告書でも今後の実験的確認が必要と述べている（第2次とりまとめIV-22ページ）
- 水素脆化が起こる心配はないか
 - コンクリート埋設坑から浸み出すアルカリの影響
 - 硬化した溶接箇所の問題

考古学的知見は役立つか

考古学的知見（ナチュラルアナログデータ）を援用

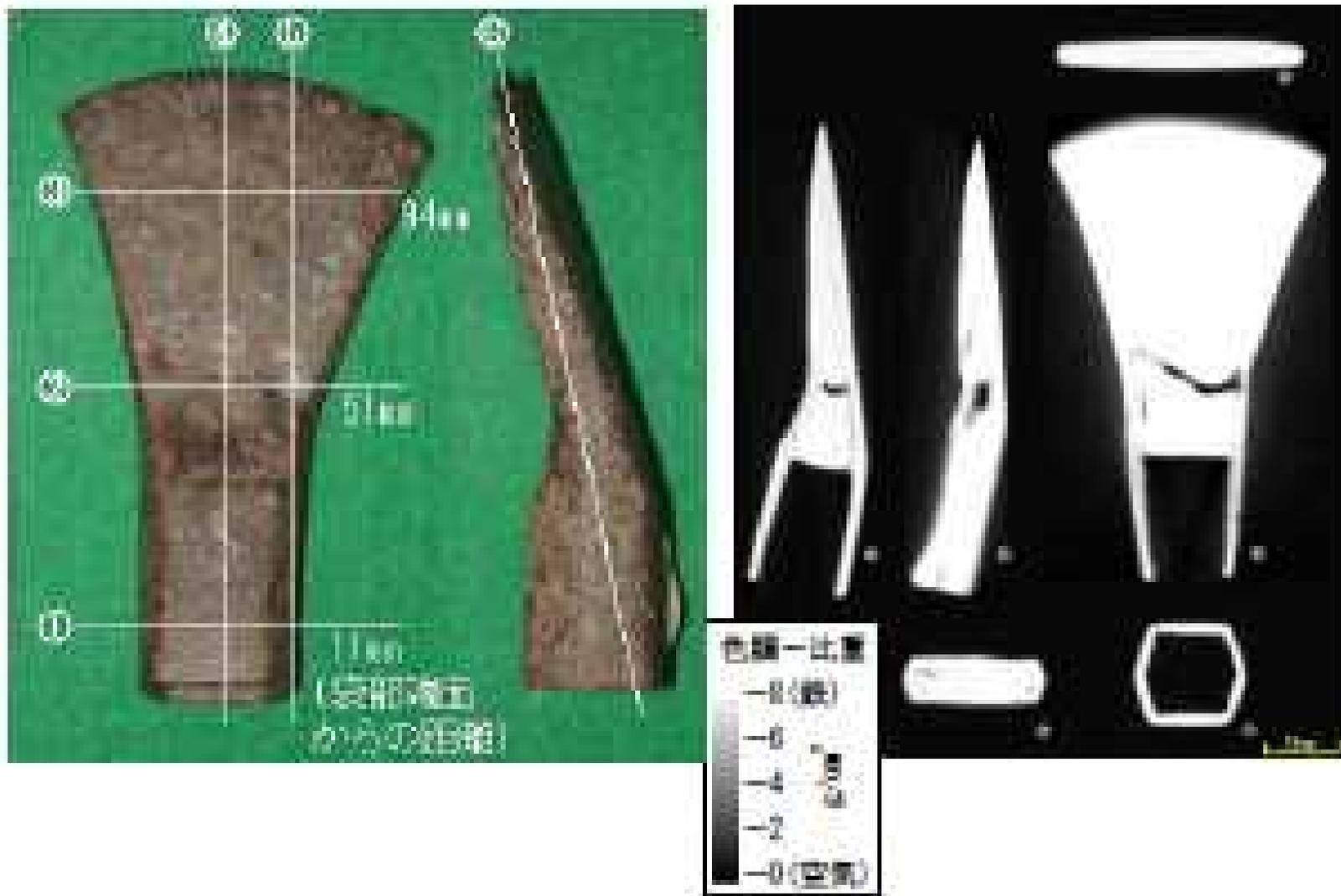
- 実験がせいぜい数年間の腐食挙動を調べているのみなので、それを補強するため
- 腐食寿命評価（第2次とりまとめIV-29ページ）
「国内外で考古学的鉄製品の長期の腐食事例の調査に基づき予測される1,000年間の腐食深さは1～14mmである。……炭素鋼オーバーパックにおよそ32mm以上の腐食代を与えることにより1,000年以上の放射性物質の閉じ込めを期待できると考えられる。」

条件がよければ鉄は錆びない という考古学的事例

出雲大社の鉄斧

柱の下から750年前の鉄製の手斧(ちょうな)が発掘され、腐食深さ < 1mm以下

法隆寺の鉄釘(NUMOホームページ)



約750年前の埋没鉄器の鉞（鑿：チョウナ）（左）とそのX線CT画像（右）
 出典：核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部「人工バリア等のナチュラルアナログ研究」図1

世界最古の木造建築、 法隆寺を一千三百年もの間 支えつづけた「飛鳥の釘」。

法隆寺は釘を一本も使わない
木造建築といわれることがありますが、
実は重要な部分には太い和釘
「飛鳥の釘」が使われています。
雨のかからない部分にあった釘は、
飛鳥時代に打ち込まれた
にもかかわらず、ほとんど
さびることなく発見され、
国史を驚かせました。

出所：奈良県 法隆寺
軍部の釘は、昭和29年代の
解体修理のときに
取り出されたものです。

長さ：15.2cm
所属：社団法人
日本金属学会附属
金属博物館



法隆寺の鉄釘が錆びなかったのは？

- なぜ驚いたか
現代の鉄釘ならとつくにさびてぼろぼろになっているだろう
- 鉄の腐食は、環境だけでなく、**材質（微量不純物元素の有無と存在形態）によって大きく変わる**

クトゥブミナールの鉄塔

- A.D.5世紀頃建立、デリー郊外
大気中でほとんど腐食していない
- 乾燥した空気でさびにくいともいわれるが、
デリーは夏は相当蒸し暑い
8月の平均湿度73%、気温30°C(理科年表
による)



(C)Shibata Tetsuyuki

古代鉄は製法がちがう

- 低温で還元するため、硫黄・リン・炭素などが鉄に吸収されにくく、粒界への偏析が少ない
⇒腐食されにくい状態
- 近代製鉄（高炉法）では高温度で還元するので、まわりの酸化物を還元して溶鉄のなかに溶け込ませ、その不純物が粒界析出する
⇒表面が電気化学的に不均一になり、腐食されやすい

考古学的知見の援用は慎重にすべきである

- 古代鉄は材質のちがいによって腐食されにくかった可能性が高い
現代の鉄が同じようにふるまう保証はない
- 加えて、これらの考古学的資料は偏りのないサンプルであるとはいえない
- 腐食されて出土したサンプルも多々ある
イギリス北部の古代ローマ軍城塞跡の地中から発掘された100万本の鉄釘は、ほとんど錆び原形をとどめず

炭素鋼オーバーパックの健全性 (まとめ)

- 数年程度の実験データしかない
- 腐食挙動は複雑で起こりうるすべての条件で検討されつくしたとは考えられない
- 腐食のシミュレーションモデルは超長期間の外挿を可能にするほど確かなものではない
- 考古学的知見は傍証にはならない

予測は価値中立的か？

技術は価値観にもとづいて選択される

- 技術は客観的法則性にもとづいておこなわれるが、事業者の目的に沿って具体化される
- 何を重視するか(機能性(性能)・経済性(コスト)・安全性・環境適合性)は技術者を含む事業主体が、社会の動向を見ながら判断する
 - ⇒ 技術は価値中立的ではない

工学は「ものづくり」のための知識の体系

- 物を作るという観点から事実や法則が重要さに応じて取捨選択されている
- よって、自然科学的認識を基礎としているが価値中立的でない
- そのものを作るべきか否かの判断基準は工学の内部にはない

予測とは？

- 科学的知見を基礎とするが、認識そのものが目的ではなく、その知見を生活(社会)に役立てることを目的にしている
 - 例：天気予報・気象予測・地球温暖化予測
 - 環境アセスメント
 - 原発敷地で想定すべき地震動の大きさ、など
- 「予測」は「技術」と同じく、価値中立的ではない
予測を必要とする人たち(事業者や社会)が要求し、その人たちの価値判断や予断が予測に影響を及ぼす

ある精神科医の発言

- 「予測は、ほぼいつも「期待」という色眼鏡を通した予測なのです。」(名越康文、『毎日新聞』2011年1月26日夕刊)
- 予測という行為における心理面からのバイアスを指摘

基礎研究と予測とのギャップ

- (財)原子力安全研究協会の専門委員会報告書「オーバーパックの長期耐食性に関する調査」(JAEA-Res.2006-58)
6人の大学研究者が基礎的な調査研究をおこなっている(炭素鋼腐食モデリング(柴田俊夫)、微量合金元素の影響(杉本克久)、炭素鋼の水素脆化(水流徹)など)
- **いずれの研究でも超長期の予測はしていない**
情報は不十分で今後の研究が必要としている
- 一方、前述の「2次とりまとめ」では、1,000年間大丈夫だという予測が述べられている
- 基礎研究の結果がうまく利用されている

予測の段階から中立的立場での 評価が必要

- 上記のギャップを埋めるには、「結論」を前提としない評価のシステムが必要
- 「オーバーストックの健全性が示せない」という可能性を排除しない評価システム
- 判断主体が中立的、あるいは、多様であること
- 学術会議提言(中立的・独立的評価の場)は、政策決定段階だけでなく、予測の段階から必要