

1. はじめに

原発の運転経験の蓄積は、材料工学的に実物実験そのものであり、これまでに様々な欠陥を実証、明らかにしてきた。老朽化に伴って様々な欠陥が生じたが、それらは原発の安全性を直接的に、間接的に脅かす。原発の設置者にとっては、老朽化問題はその経済問題に密接に関わると共に安全性、経済性を媒介にして廃炉問題とも深くかかわる。

はじめに原発の危険性と安全確保の方法について簡単に紹介し、老朽化の実態とそれによってもたらされる機器の欠陥と安全上の問題及びその対策について議論する。次に、最近の安全問題について廃炉問題について概略的に指摘したい。今後、個別に議論を深めて行きたいと考えている。

2. 原発の老朽化[6,7,8]

老朽化の原因、態様：材料の老朽化、機器のがた
安全性に直結する老朽化問題の対象機器：

安全上重要な機器、交換を前提にしない機器

8つの機器と1構造物

2-1 老朽化の原因、態様

(1)材料の疲労：

繰り返し応力のもとで、静的強度よりはるかに低い応力によって破壊を起こす。
振動による細管損傷

(2)耐食合金の応力腐食割れ：

引っ張り応力と腐食環境(高温、塩化物)のもとで、割れが生じる
蒸気発生器細管、炉心シュラウド

(3)放射線損傷：脆性遷移温度の上昇、材質の劣化

圧力容器の脆性遷移温度の上昇、炉内構造物の割れ

(4)ケーブルの劣化

(5)コンクリートの劣化

(6)機器結合のゆるみ、破損

2-2 構造材料の老朽化現象

(1)耐食合金ステンレス鋼の応力腐食割れ

ステンレス鋼(オーステナイト相)：304(Ni/Cr=18/8)、316

炉内構造物、配管、ポンプ部品

鋭敏化：500度から800度で耐食性の低下

(2)ステンレス鋳鋼(2相ステンレス鋼)

配管の曲管部、ポンプ本体

熱時効：300度以上で長時間、靱性(強度)の低下

(3)インコネル600(Ni/Cr=70/15, MA/TT)、インコネル690(Ni/Cr=60/30, TT)

SG細管、圧力容器管台、炉内構造物

特殊熱処理で耐食性を強化(700度で15時間)

(4)低合金鋼、SUS内張り

圧力容器、加圧器、蒸気発生器

脆性遷移温度の上昇

(5)炭素鋼

BWR主蒸気器管、給水管

腐食減肉

3. 重要な機器における老朽化問題の実態

PWR

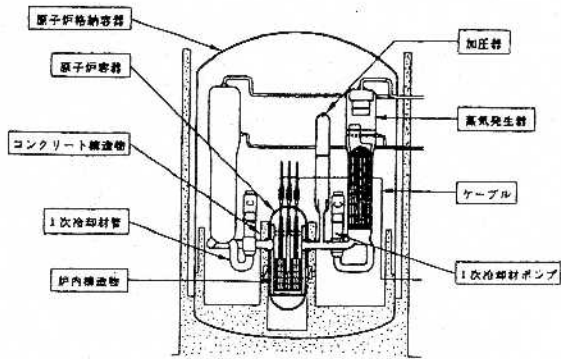
3-1 蒸気発生器の細管損傷とその交換[9,10]

(1)PWR原発でSG細管破断事故が発生

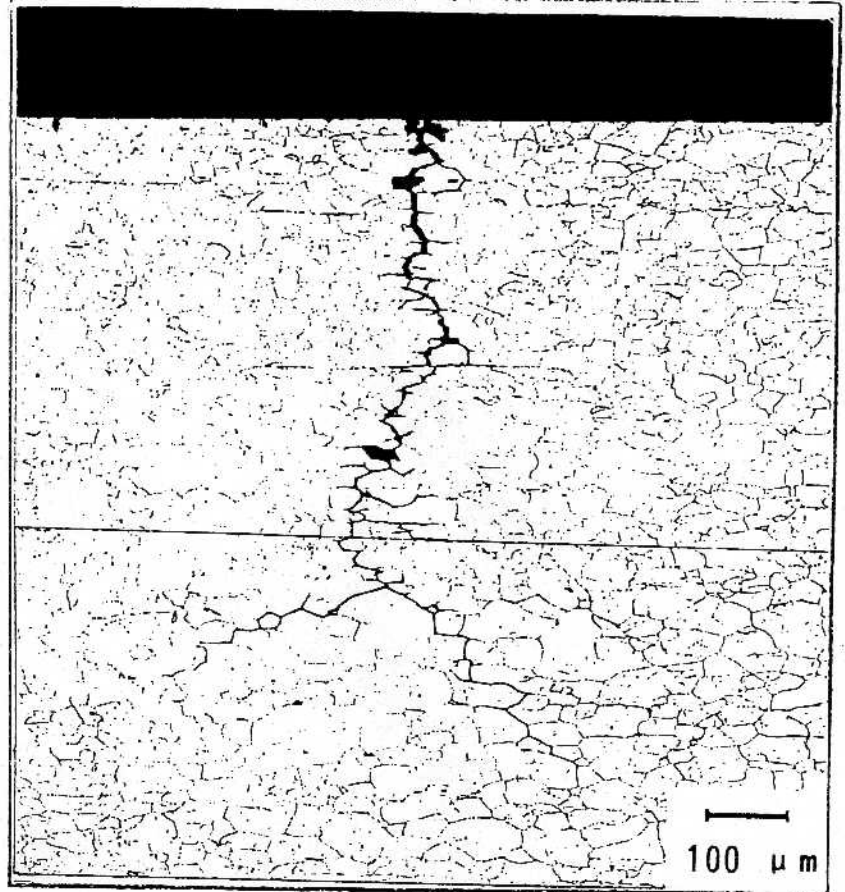
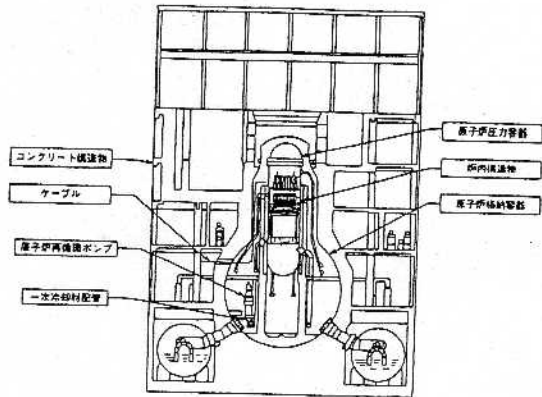
ポイントビーチ原発、ギネ原発、ノースアンナ原発、美浜2号機

TMI事故に似た事故経過

図3 炉内封入装置
PWR (英紙発露所1号機の場合)



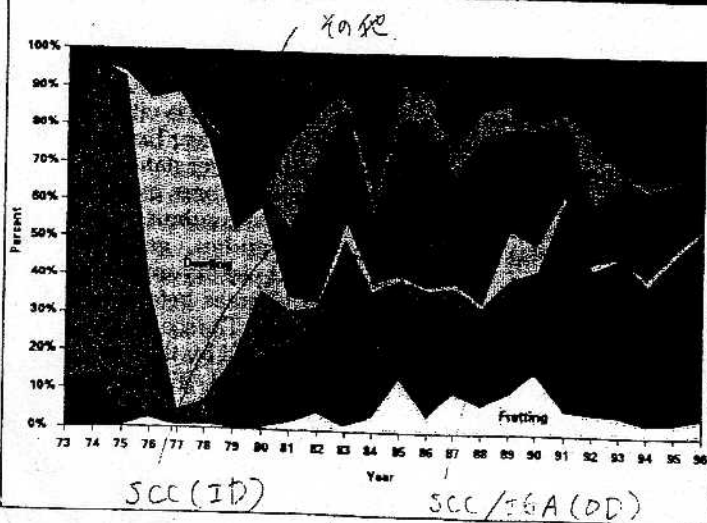
BWR (福島第一原子力発電所1号機の場合)



2-1

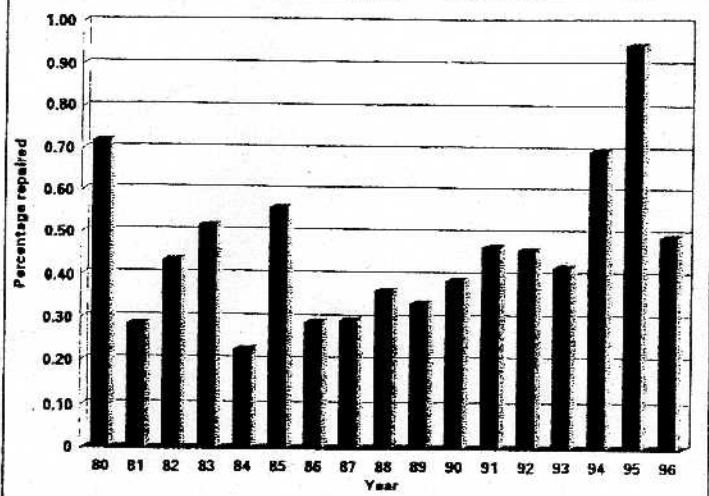
2-2

Fig 3. Causes of steam generator tube plugging



2-3

Fig 5. Percentage of steam generator tubes repaired world-wide



2-4

- 一次冷却材の流失、一次系の圧力が下がらず事故収束に様々な困難
- (2) SG細管損傷の実態
損傷の原因と割合
損傷の対策：
スリーブ補修、施栓、2次系冷却水のクリーニング、SG交換
SG細管の材料を変える：Inconel MA600 から TT600 TT690 へ
- (3) SGの交換
1996年までに世界で37機、日本で7機のSGが交換された

3-2 圧力容器上蓋制御棒案内管貫通部の損傷とその交換[8,11,12]

- (1) 損傷の実態
91年フランスの原発ではじめて見いだされた。その後、多数の原発で
日本では遅れて見いだされた
関電ではPWR7機の交換が行われつつある
出力調整棒の撤去
下部貫通部も同様の条件

3-3 配管の損傷[8]

- (1) 応力腐食割れによる配管の亀裂
(2) 熱時効による応力腐食割れ
曲管部
ポンプ本体

3-4 圧力容器の脆性遷移温度の上昇[1,13]

微少な亀裂が圧力容器の急速な破壊を引き起こす
高圧下での熱衝撃：高圧注入系による注水
脆性遷移温度の評価の困難さ
データのばらつき、亀裂の大きさの評価の困難さ
誤差の大きな評価式
監視試験片による予測
安全側の評価になっていない

BWR

3-5 炉心シュラウドの応力腐食割れと炉内構造物の交換[14,15]

- (1) 損傷の実態
1990年に世界で最初にスイスで見つかる
1994年福島第一の2号機で見つかる
(2) 福島第一3号機における炉内構造物(シュラウド)の交換
高放射線下での切断、溶接作業
13人Si、化学除洗五の

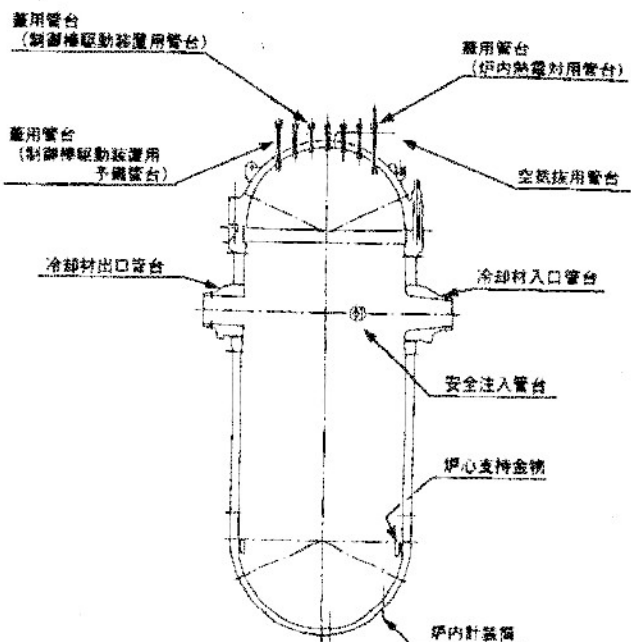
4. 最近の安全問題

- 4-1 地震時における原子炉出力の上昇(BWR)[16]
地震時にBWR原発で中性子束高により原子炉停止が起こった
振動では原子炉は止まらなかった。
地震振動による制御棒間の間隔の変動
- 4-2 制御棒問題[17,18]
制御棒の固着、移動速度の低下
燃料の高燃焼化に伴う制御棒の曲がり
- 4-3 PWR原子炉水位計問題
圧力容器上部の水位で、炉心ではない
- 4-4 破砕物等によるECCSポンプ再循環機能の低下(BWR)[19,20]
絶縁破砕物、ゴミ、渦による気泡の巻き込み等によるECCS機能低下

Table 3. Replacement steam generators (December 1996)

Plant	Year 85	Model	Power MW(e)	Construction Start	Operation (years)	Power MW(e)	Replacement Location (date)	Replacement Cost (million \$)	Replacement Cost (\$/kW(e))
Sunny 2	3	WAS-11	1400 TT	Dec-80	8	3.6	4-86	2141	174
Sunny 1	3	WAS-11	1400 TT	Dec-81	8	3.6	4-86	1728	154
Turkey / Samsun	3	WAS-11	1400 TT	Nov-81	10	3.2	4-87	2152	190
Turkey / Samsun	3	WAS-11	1400 TT	Nov-81	9	3.2	4-87	1800	190
Obayama	2	WAS-11	1400 TT	Dec-81	14	11.2	4-87	850	107
Bohn/Baden 1	2	WAS-11	1400 TT	Nov-81	13	8.2	4-87	575	112
Bohn/Baden	2	WAS-11	1400 TT	Nov-81	13	8.2	4-87	138	107
Cook 2	4	WAS-11	1400 TT	Dec-81	11	3.2	4-87	218	113
Indian Point 3	3	WAS-11	1400 TT	Dec-81	12	3.4	4-87	141	118
Kingdick 2	3	WAS-11	1400 TT	Aug-82	12	3.2	4-87	222	118
Dampierre 1	3	WAS-11	1400 TT	Dec-82	10	3.2	4-87	222	118
Pohankas	3	WAS-11	1400 TT	Dec-82	13	8.2	4-87	487	118
Wilkes 2	2	WAS-11	1400 TT	Jan-83	17	10.2	4-87	267	118
North Anna 1	3	WAS-11	1400 TT	Apr-83	15	3.0	4-87	140	118
Doel 3	3	WAS-11	1400 TT	Dec-83	11	4.0	4-87	196	118
Bethou 1	2	WAS-11	1400 TT	Jul-83	14	19.5	4-87	110	158
Bugey 1	3	WAS-11	1400 TT	Feb-84	12	4.8	4-87	160	181
Gravelines 1	3	WAS-11	1400 TT	Mar-84	14	4.1	4-87	145	1108
Gravelines 2	3	WAS-11	1400 TT	Mar-84	17	13.6	4-87	145	1200
Nuham 2	2	WAS-11	1400 TT	Aug-84	13	11.5	4-87	146	1142
Czech 1	3	WAS-11	1400 TT	Dec-84	12	12.8	4-87	68	1200
Summer	3	WAS-11	1400 TT	Dec-84	12	3.1	4-87	221	1108
QEL	4	WAS-11	1400 TT	Mar-85	12	3.6	4-87	218	1200
North Anna 2	3	WAS-11	1400 TT	Jan-85	15	3.2	4-87	182	1114
Tihange 1	3	WAS-11	1400 TT	Jan-85	13	1.8	4-87	324	1126
Kingdick 1	3	WAS-11	1400 TT	Apr-85	14	1.2	4-87	152	1182
Asa 1	3	WAS-11	1400 TT	Oct-85	13	1.2	4-87	136	1181
St Laurent des Eaux 2	3	WAS-11	1400 TT	Dec-85	13	10.3	4-87	21	1113
Dampierre 2	3	WAS-11	1400 TT	Feb-86	14	1.3	4-87	123	1100
Nuham 1	1	WAS-11	1400 TT	Apr-86	25	10.1	4-87	111	1208
Girno	1	WAS-11	1400 TT	Jun-86	25	19.8	4-87	104	1108
Doel 2	1	WAS-11	1400 TT	Jul-86	9	1.8	4-87	63	1125
Takahama	3	WAS-11	1400 TT	Aug-86	21	1.2	4-87	112	1220
ASCO 2	1	WAS-11	1400 TT	Oct-86	10	0.9	4-87	156	1181
Albrado 1	1	WAS-11	1400 TT	Oct-86	15	1.1	4-87	139	1154
Gravelines 1	4	WAS-11	1400 TT	Nov-86	11	1.2	4-87	168	1139
Gravelines 2	3	WAS-11	1400 TT	Nov-86	15	11.8	4-87	124	1100

原子炉容器のINCONEL 600材使用部位



炉内中性子濃度の状況をみる監視試験片テスト結果

(1) 加圧水型プラント

ユニット (運転年月)	取出時期	中性子濃度 (ppm)		
		初期値	第1回	第2回
美浜1号機 (1970年11月)	第1回: 1973年3月 第2回: 1981年6月	-1	45	51
美浜2号機 (1972年7月)	第1回: 1975年3月 第2回: 1980年12月	-3	49	59
美浜3号機 (1976年12月)	第1回: 1977年11月	-20	2	
高浜1号機 (1974年11月)	第1回: 1976年4月 第2回: 1984年2月	-4	22	54
高浜2号機 (1975年11月)	第1回: 1976年11月	-30	-13	
高浜3号機 (1985年1月)	第1回: 1985年11月	-25	-20	
大飯1号機 (1979年3月)	第1回: 1980年7月 第2回: 1985年4月	-15	-6	11
大飯2号機 (1979年12月)	第1回: 1981年2月 第2回: 1985年9月	-18	4	52
伊方1号機 (1977年9月)	第1回: 1978年4月 第2回: 1982年10月	-25	0	16
伊方2号機 (1982年3月)	第1回: 1983年3月	-30	-15	
玄海1号機 (1975年10月)	第1回: 1976年11月 第2回: 1980年4月	-16	35	37
玄海2号機 (1981年3月)	第1回: 1982年2月 第2回: 1985年11月	-25	7	8
川内1号機 (1984年7月)	第1回: 1985年2月	-25	-4	

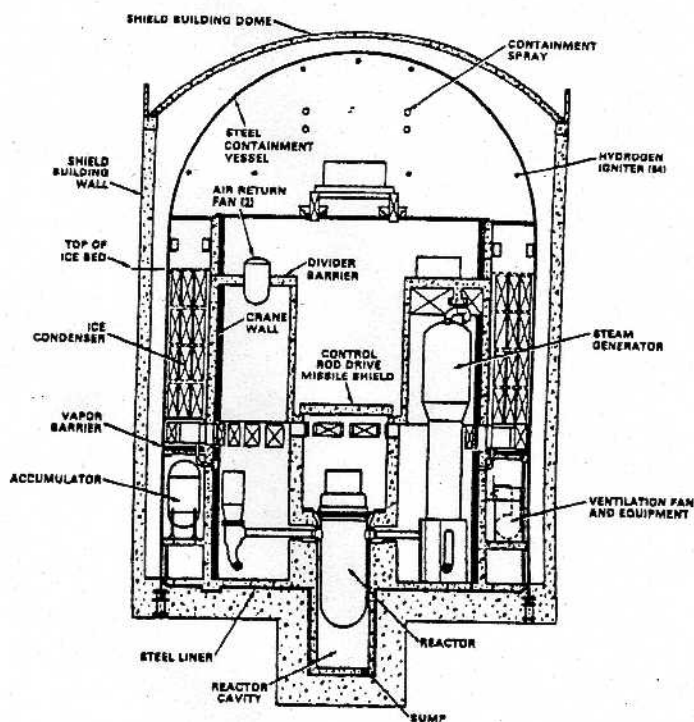
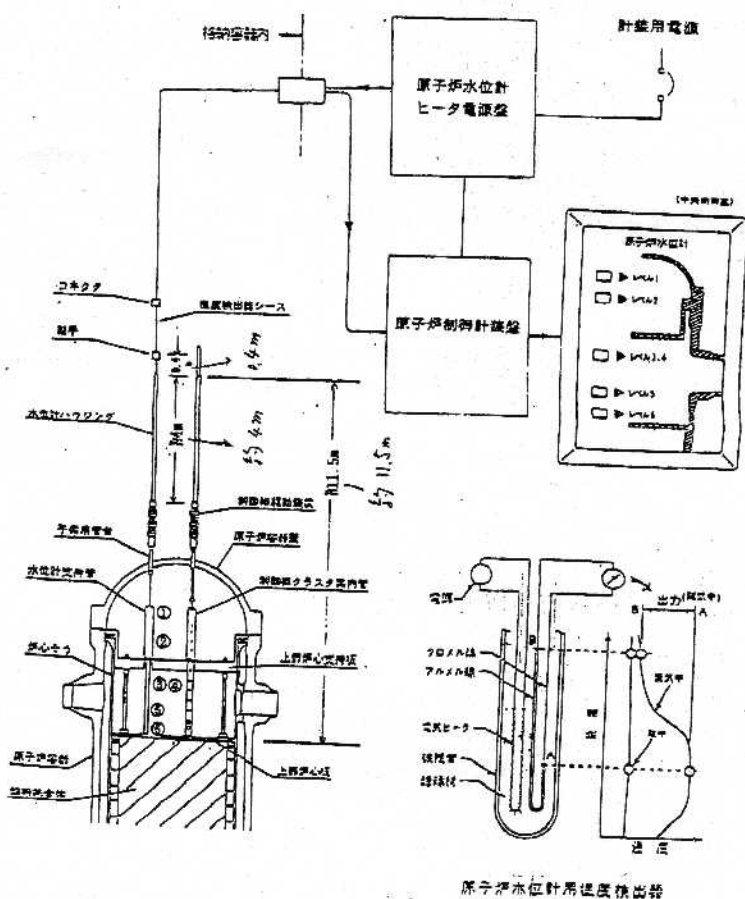


図1 取替対象機器 糸子力 eye 1998. 4月3日付

原子炉水位計の概要 (温度計方式)



4-5 過酷事故(Severe Accidents)問題[21,22,23,24]

5つの原発について具体的に検討

- (1) 事故要因: blackout、シールドLOCA、地震、火災
- (2) アイスコンデンサー型格納容器をもつPWR原発の安全問題

Sequoyah 原発:

格納容器: 容積半分以下、設計耐圧約 1/5: 水素爆燃

ECCSの有効性:

格納容器スプレイにより20分で燃料取り替えタンク料は空

ECCS水源の切り替え操作が必要、

20分では操作ミスの可能性が大きい

大飯1、2号

4-6 故障データ(LER)に基づく過酷な炉心破損事故の前兆[23]

年間3000件に及ぶLERsを評価し、重大事故の前兆を探る

そのうち1400件を詳細に検討:

原子炉の停止、機器の2つ以上の不作動、予測外の事象

63件が重大事故の前兆として選択された

毎年1000ページ前後の報告書がNRCによって作成されている

4-7 廃炉問題[25,26]

クリアランスレベルの設定: 廃炉に伴う約50万トンの廃物のうち約96%を一般廃物として認定する

参考文献

1. 原子力市民年鑑98、原子力資料情報室
2. 安全委員会月報
3. Nuclear Engineering International
4. Transactions, American Nuclear Society
5. 原子力工業
6. 安全委員会月報、平成8年4月、高経年化に関する基本的考え方
7. Nuclear Engineering International 1997, Jun. 23-25
8. 原子力発電プラントの高経年化対策の現状に関する国内シンポジウム、平成8年10月、日本溶接協会
9. 原子力工業、41巻4号、6-31
10. Nuclear Engineering International, 1998 Feb, 38-41
11. 安全委員会月報、平成9年1月、47-48
12. グリーンピース
13. 軽水炉圧力容器鋼材の照射脆化研究と寿命評価への課題、1992、6月
14. 技術と人間、藤田裕幸、50-66
15. 原子力eye、44-47
16. 安全委員会月報、平成9年5月
17. Nuclear Engineering International, 1996, Nov, and 1997, Jun
18. 安全委員会月報、平成8年11月、平成9年5月
19. Transactions, American Nuclear Society, 1997, June, 286-290
20. NUREG/CR-6224
21. NUREG-1150, Severe Accident Risks, vol. 1, 1990
22. NUREG/CR-5586, Mitigation of direct containment heating and hydrogen combustion events in Ice condenser plants, 1990
23. NUREG/CR-4674, Precursors to Potential Severe Core Damage Accidents 1985-1995
24. NUREG/CR-5544
25. 原子力工業、43、10号、2-31
26. 安全委員会月報、平成9年5月