

福島第一原子力発電所 1号機 格納容器内部調査写真からの随想推理

石川 迪夫

本文の目次

1. 映像全体の概要
2. 三点の写真
 2. 1 空洞写真
 2. 2 ハウジングの落下状況
 2. 3 突起状堆積物
3. ペDESTAL壁の空洞化は、どの様にして起きたか
 3. 1 1号機事故の概要
 3. 2 事故に関与したジルカロイ量
 3. 3 事故に関与した水量
 3. 4 ジルカロイ・水反応の特徴
 3. 5 ジルカロイ酸化物の脆化破損
 3. 6 ジルカロイ燃焼の防止法；徐冷
 3. 7 圧力容器の破損に伴う炉内状況の変化
 3. 8 ジルカロイ・水反応による1号機の破壊エネルギー
 3. 9 1号機の炉心溶融と水素爆発
 3. 10 ペDESTAL壁の損傷と空洞
 3. 11 3000Kの輻射熱
4. 写真からの随想
 4. 1 福島事故におけるジルカロイ燃焼事故の実例
 4. 2 溶融炉心は流れない
 4. 3 ペDESTALの中の嵐
5. LOCA—ECCS指針との関係
6. 結言

写真1 ペデスタル内部空洞の写真



写真2 制御棒ハウジングの落下写真



写真3 3本一組で落下したとみられる制御棒駆動機構ハウジング写真



写真4 突起状堆積物の写真



1-7 背景(原子炉压力容器・格納容器の概要図(2号機の例))

8

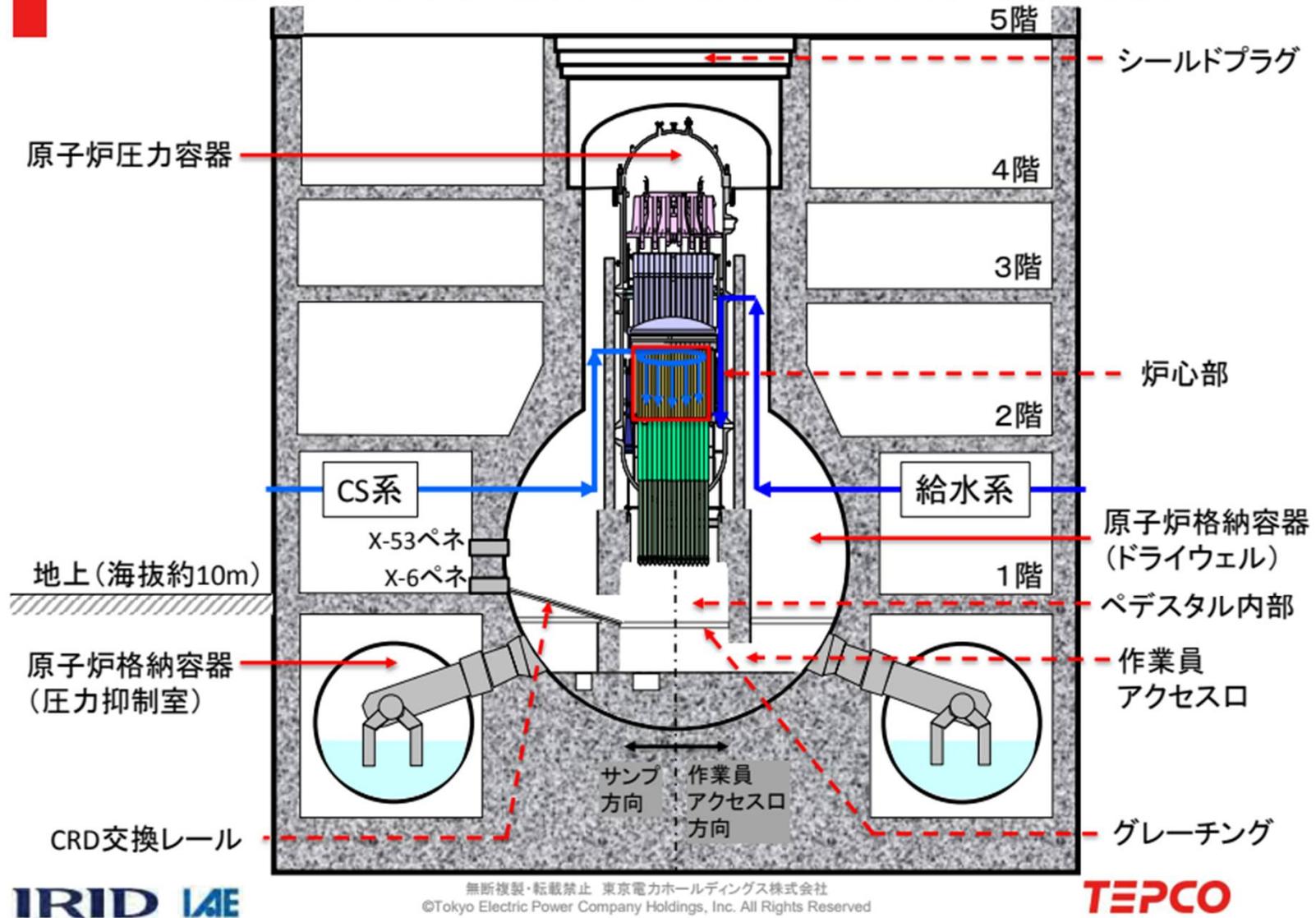
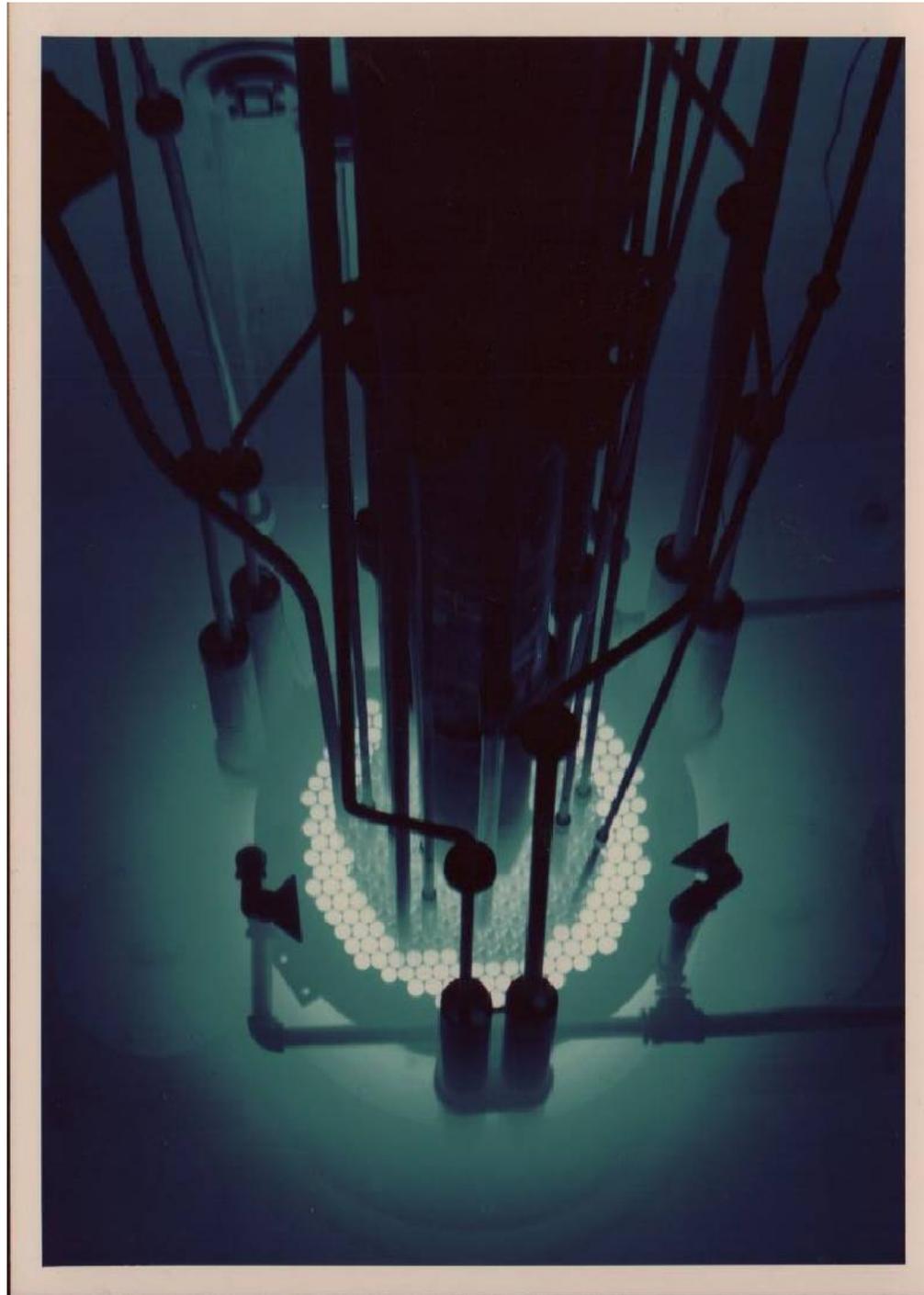
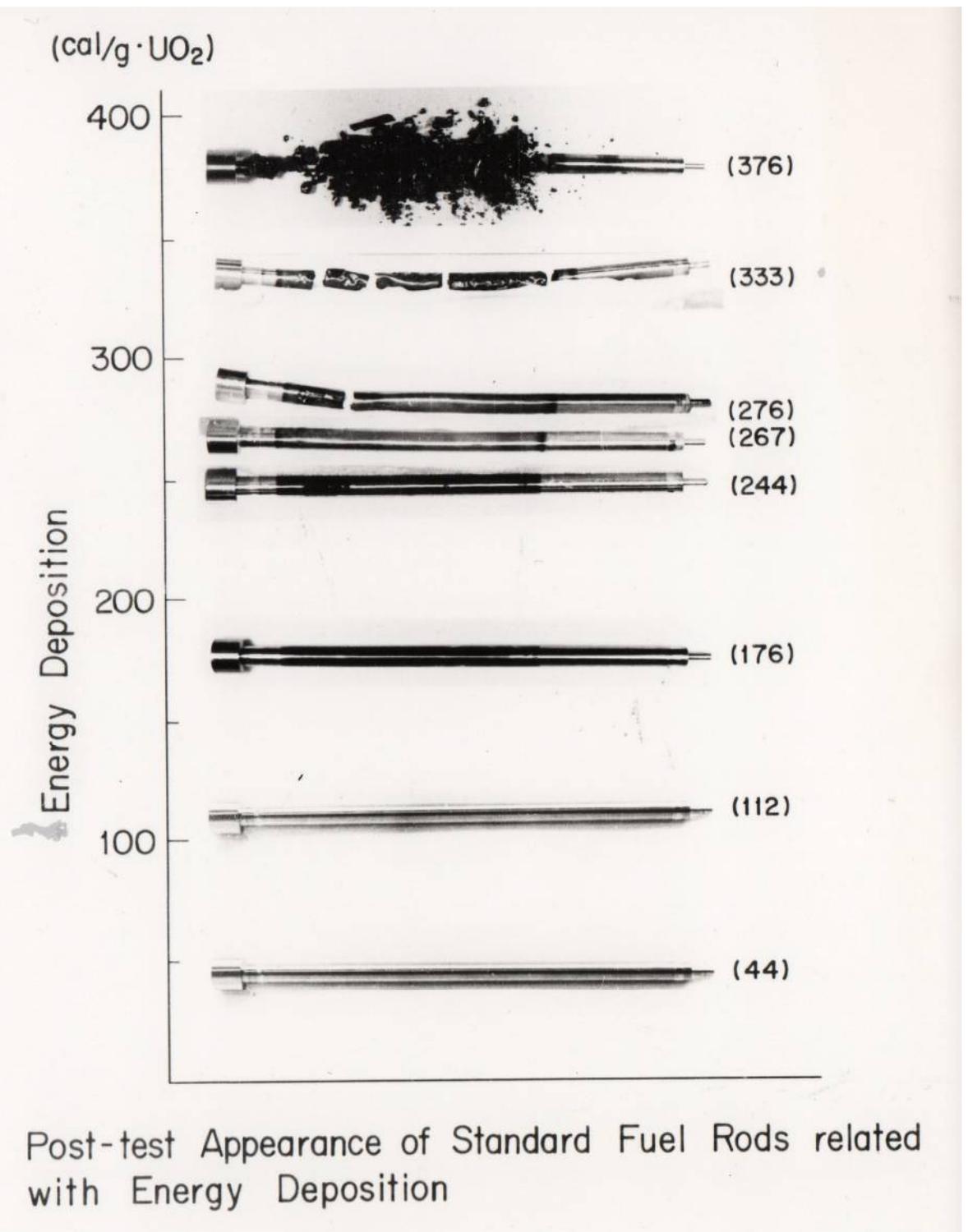


図1 原子炉压力容器・格納容器の概念図

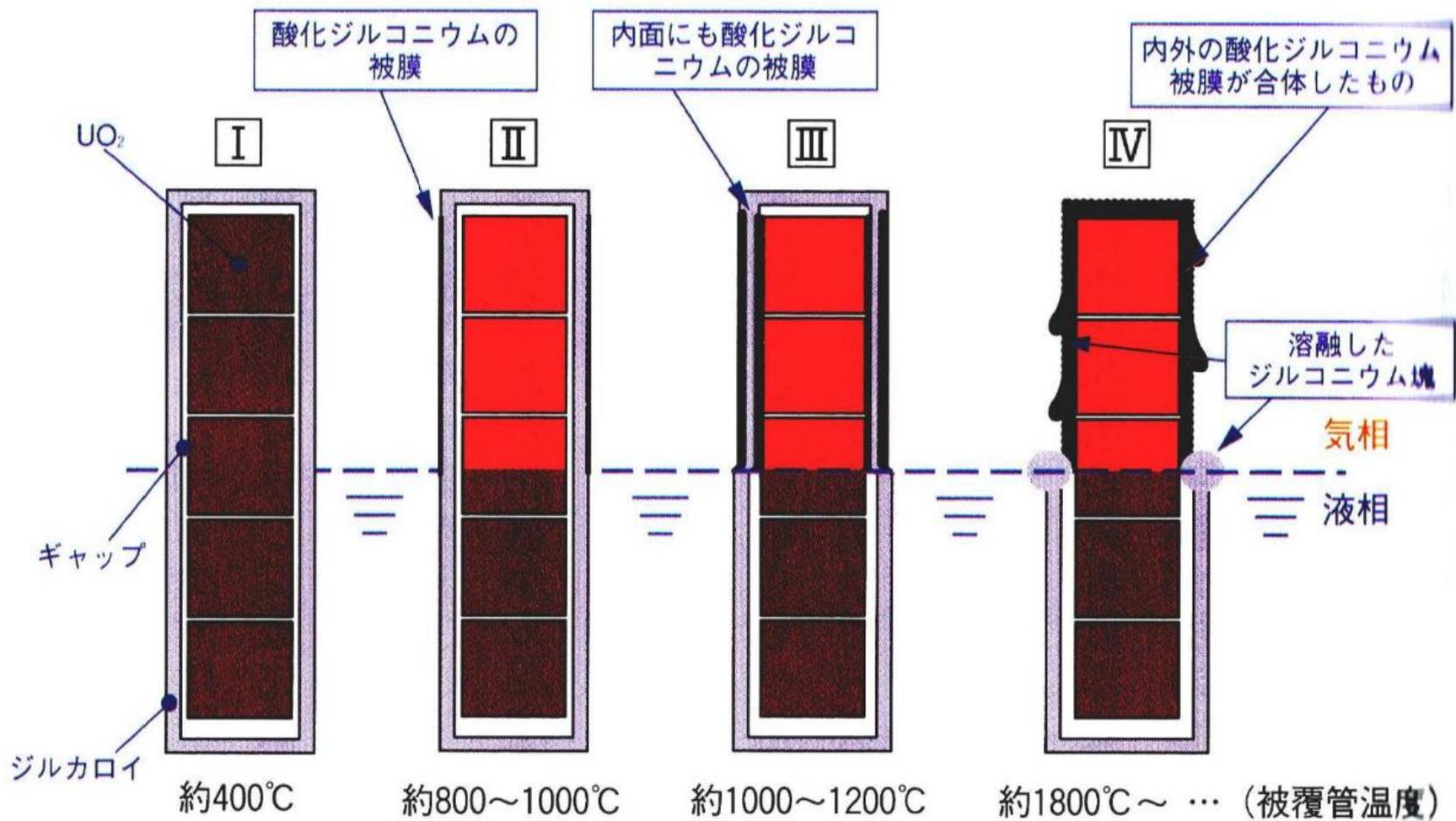
補足図 1
NSRRのプール写真



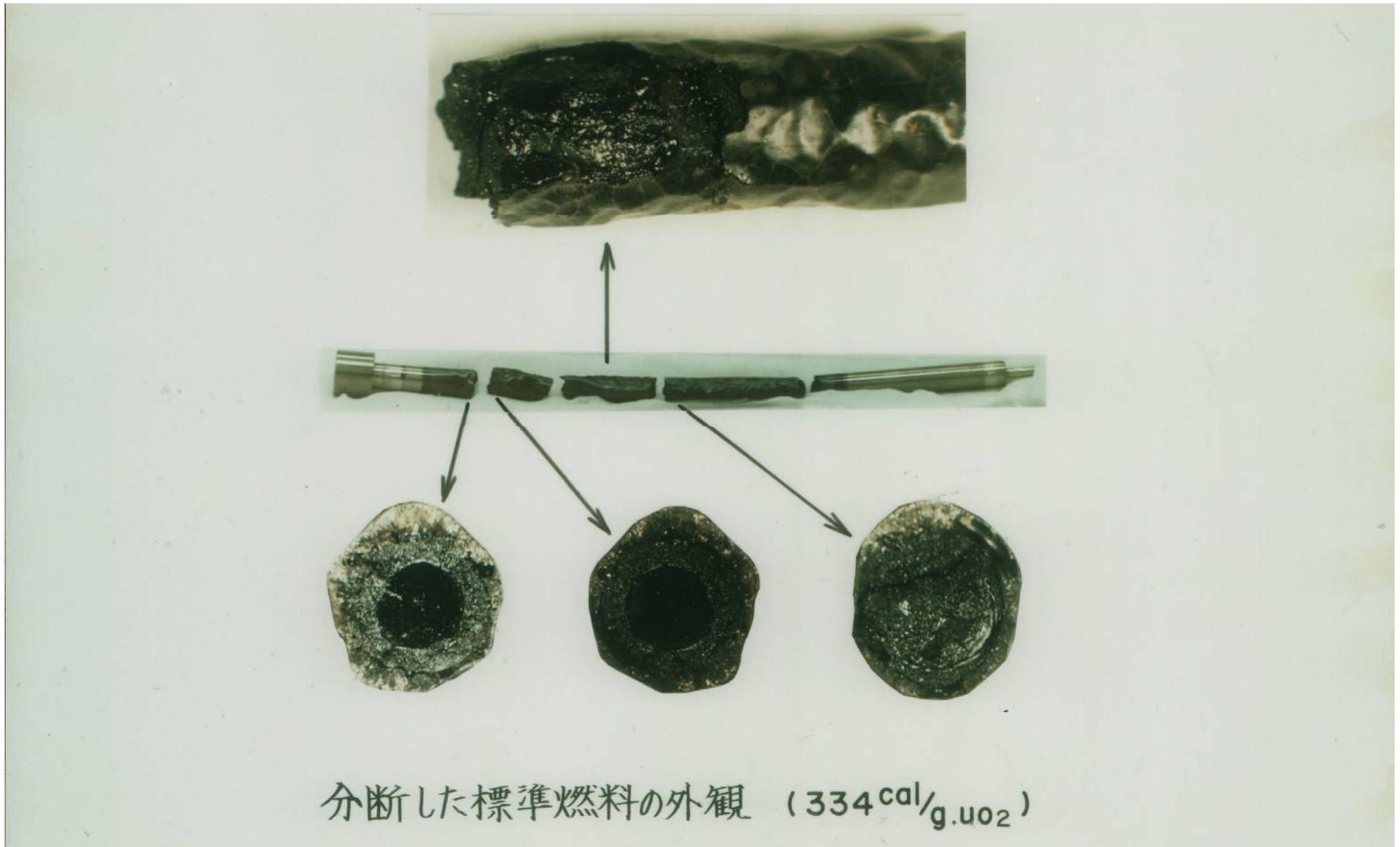
補足図 2 燃料破損



第一部 炉心溶融・水素爆発はどう起こったか

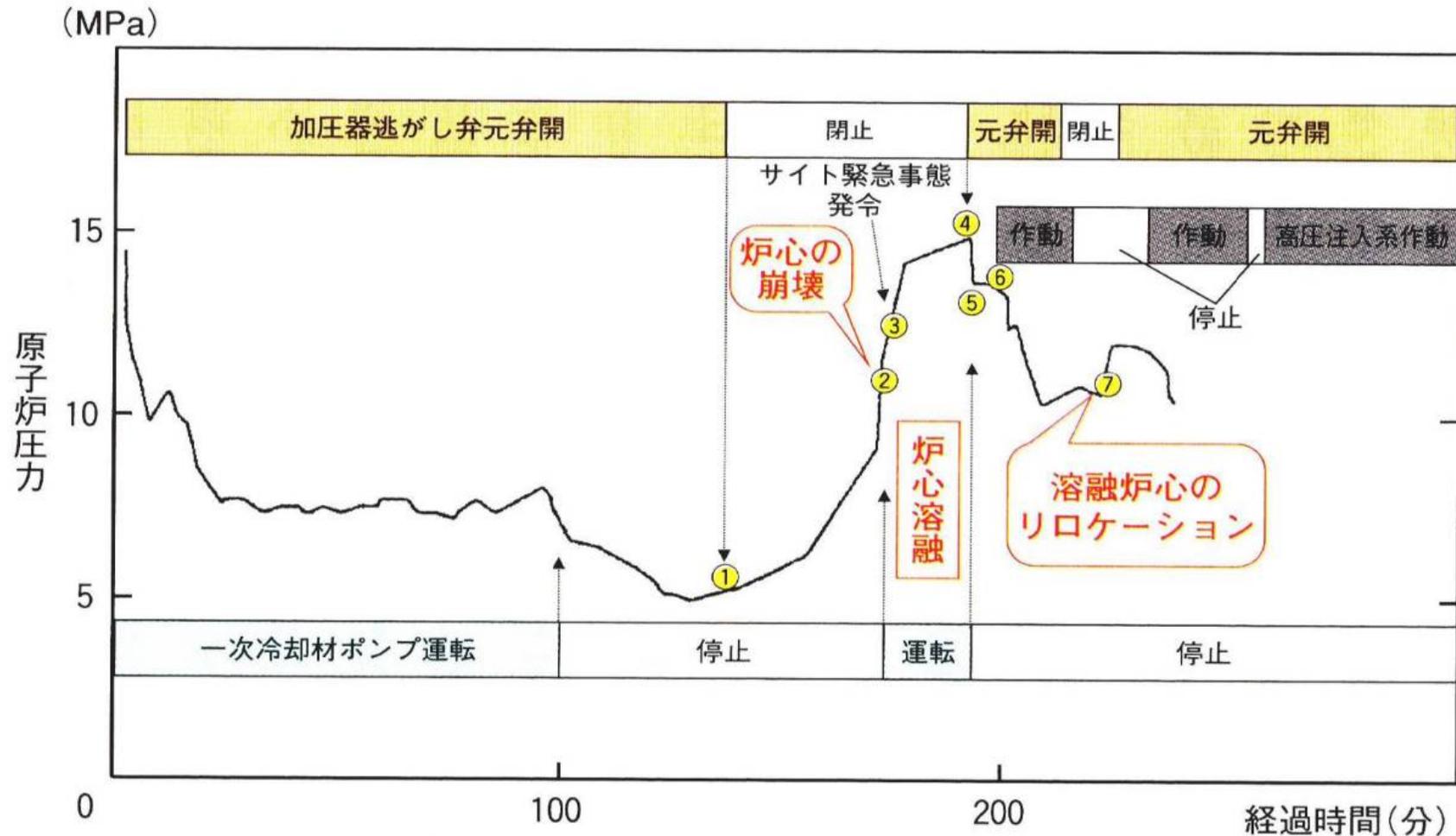


補足図3 事故時の被覆管温度と燃料棒の状態図 (参考文献1の図1.1.6)



補足図4 NSRR実験における燃料棒の酸化および分断状況図 (参考文献1の図1.1.4)

第1章 スリーマイル島原子力発電所事故



出典：「J. M. Broughton et al., Nuclear Technology 87(1989)34-53」に加筆

補足図5 TMI 2号機の原子力圧力と事故シーケンス (参考文献1の図1.1.8)

表 3 ジルカロイ・水反応（反応速度に及ぼす温度の影響）

温度 (°C)	ジルカロイ表面から 1mmが酸化する時間
1000	246h(約10日)
1100	87h(3.6日)
1200	36h(1.5日)
1300	16h
1400	8h
1500	4.4h
1600	46分
1700	25分
1800	14分
1852(MP)	11分

表1 1号機の主要な事故経緯—その1—

1. 地震発生：3月11日14時46分、

震度、マグニチュード9.0—原子炉緊急停止

イソコンによる原子炉冷却の開始、14時52分

津波襲来、15時27分頃——全電源喪失発生

停電によるイソコン停止

(停電の回復：3月20日頃)

1号機は、全電源喪失に続く、緊急炉心冷却系の不作動と考えれば良い

2. 1号機の冷却状況

原子炉の水位

11日18時頃—炉心頂部

20時頃—炉心下部（炉心温度上昇）

24時頃—炉心の水なくなる（炉心・輻射冷却のみ）

（格納容器圧力0.6MPaに上昇）

表1 1号機の主要な事故経緯—その2—

空っぽ炉心

12日2時半頃——原子炉底のクリーブ破損発生（炉心最大温度2000℃程か？）

原子炉圧力低下、格納容器圧力上昇（約0.85MPa）

炉心燃料の一部、ペDESTAL床に落下、冷却か？

12日5時頃——消防車による原子炉へ試験注水（6回、1トン／回）

（格納容器圧力0.8MPaに一時上昇）

ジルカロイ・水反応の復活か？

12日9時——消防車による原子炉注水（2回、75トン）

注水は炉心に掛からず、圧力容器壁に沿ってペDESTAL床上にたまる。

（格納容器圧力0.75MPaから上昇気味）

12日14時半—崩壊熱とジルカロイ・水反応により炉心温度上昇

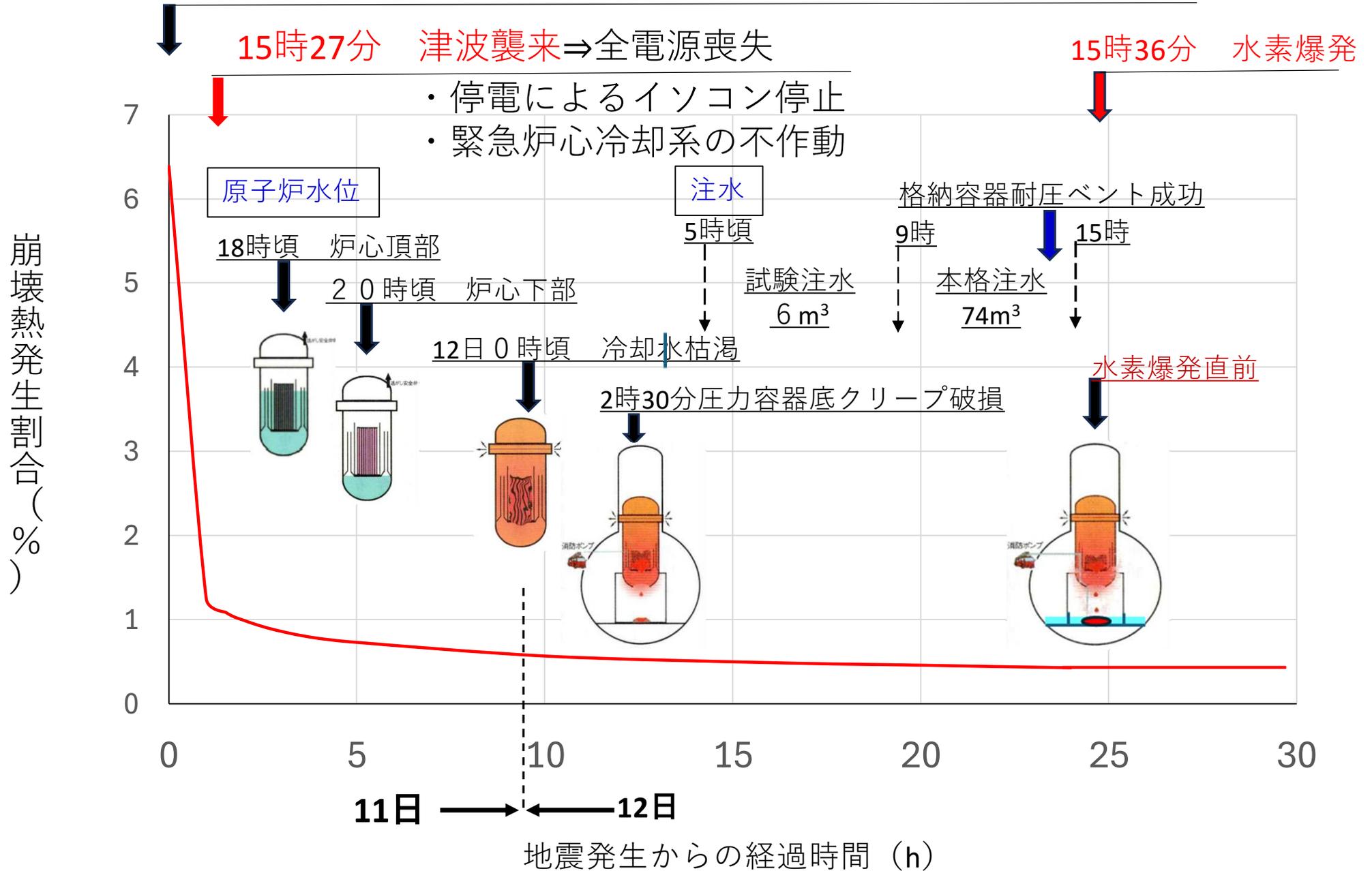
燃料棒の落下、ペDESTALの水位約25cm

ペDESTAL床上で、ジルカロイ燃焼の発生

15時36分——原子炉建屋の水素爆発

補足図6 1号機の主要な事故経緯

3月11日14時46分 地震発生 ⇒ 原子炉緊急停止



第一部 炉心溶融・水素爆発はどう起こったか

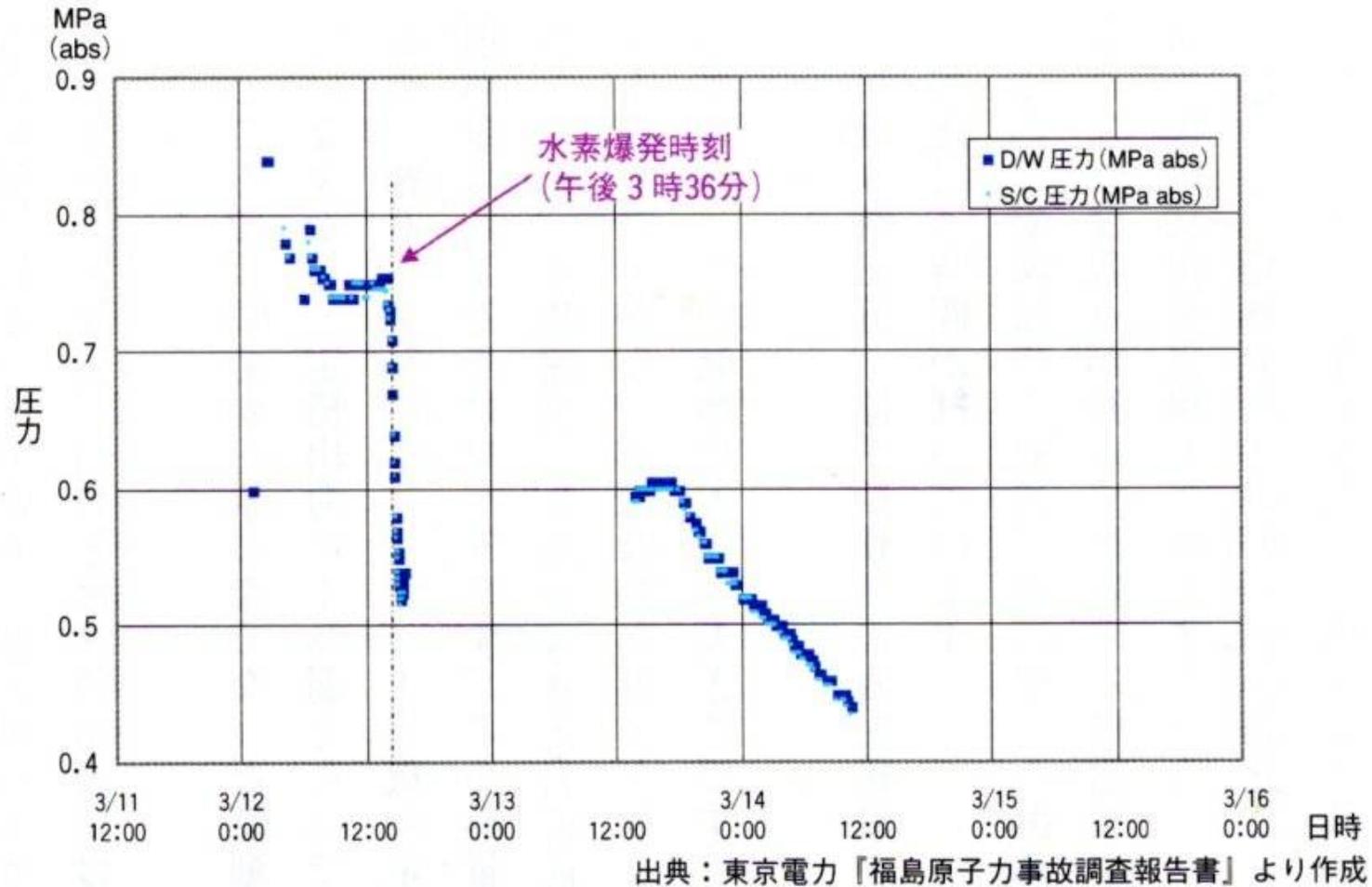


図 2 1号機の格納容器圧力の変化（測定値）（参考文献1の図1.2.23より）

表 2 記録に基づく消防車による代替注水量

イベント				最大注水時間 (*1)	注水量 (記録)	最低消防車 吐出流量 (積算注水量から算出)	解析消防車 吐出流量 (吐出圧力 1MPaから算出)
No.	日時	操作	備考	(min)	(L)	(m ³ /h)	(m ³ /h)
注水 2	[a]	3/12 5:46	注水開始	6	1,000	10	28.5 (注水中)
		5:52	注水停止				
	[b]	5:52	注水開始	(38)	1,000	>1.6	
		6:30	注水停止				
	[c]	6:30	注水開始	(85)	1,000	>0.7	
		7:55	注水停止				
	[d]	7:55	注水開始	(20)	1,000	>3	
		8:15	注水停止				
	[e]	8:15	注水開始	(15)	1,000	>4	
		8:30	注水停止				
	[f]	8:30	注水開始	(45)	1,000	>1.3	
		9:15	注水停止				
	[g]	9:15	注水開始	(25)	15,000	>36	
		9:40	注水停止				
9:40		注水開始					
[h]	14:53	注水停止	80,000L (累計) 注水完了	(313)	59,000	>11	

補足表

1号機のジルカロイ燃焼の計算に使われた材料の量とその結果

ジルカロイ燃焼に使われた材料

ジルカロイ ; 16トン (全ジルカロイ量の50%)

先行落下燃料、33%、炉心内残留燃料、10%から断定

水 ; 20トン (原子炉への注水量は75トン)

東電作製の消防車の吐出圧と流量を参考に断定

結果

ジルカロイ燃焼による発熱量 ; 1×10^8 kJ

破壊エネルギー量 ; 6×10^7 kJ

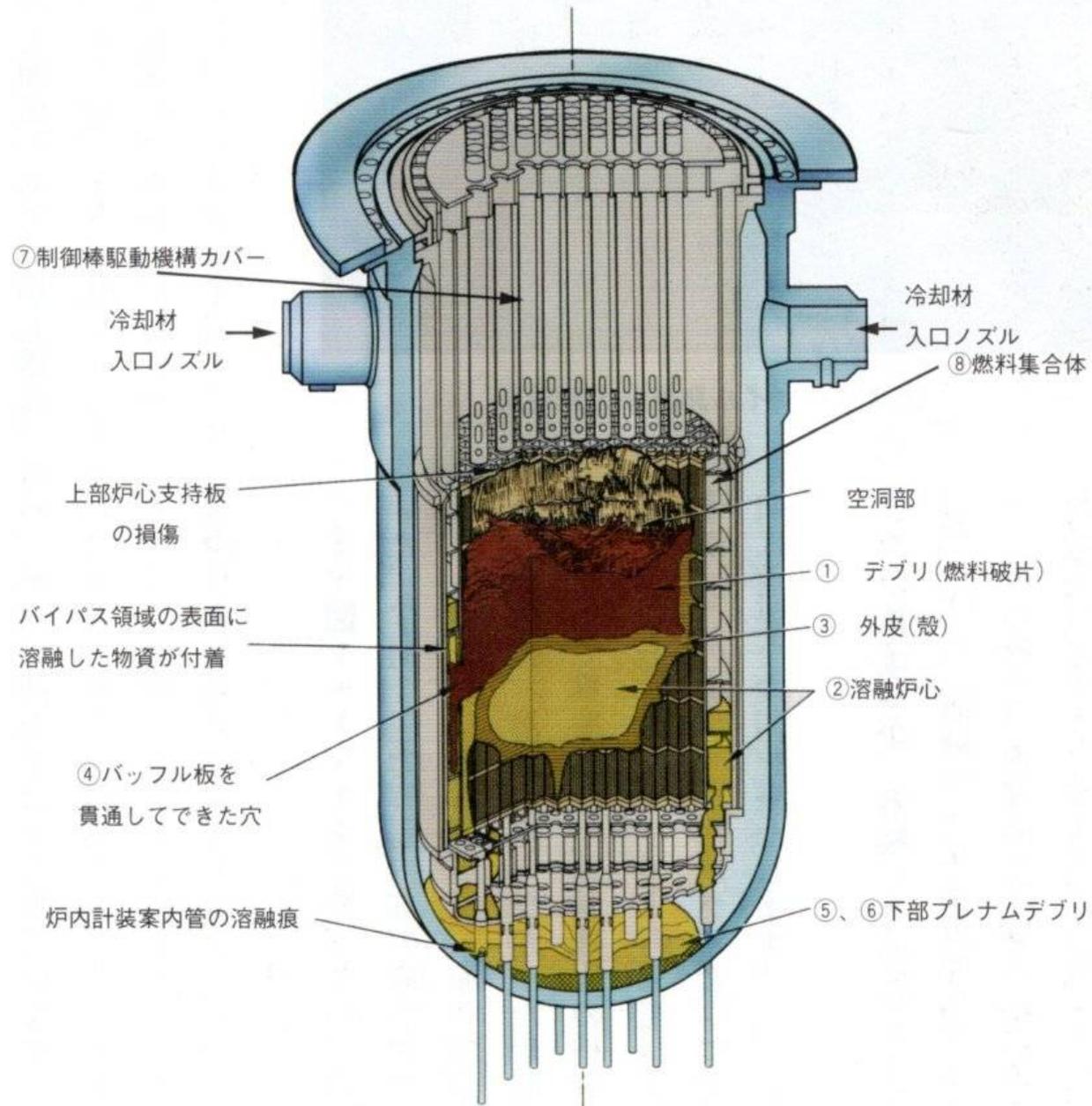
水素ガス発生量 ; 700Kg

体積 ; 8000m^3 (NTP)

$80,000\text{m}^3$ (3000°C)

表 4 コンクリートの熱分解現象

温度(°C)	主な熱分解反応
~100	コンクリート中の自由水の蒸発
400~600	水酸化カルシウムの脱水
600~900	炭酸カルシウムの分解、CO ₂ ガスの発生
1200~1500	ポルトランドセメントの溶融



出典：NRC ホームページより

<http://www.nrc.gov/images/reading-rm/photo-gallery/20071114-006jpg>

図4 TMIの炉心溶融図（参考文献1の図1.1.1より）

写真5 ペDESTAL内部の外観合成写真



軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針

昭和56年7月20日 原子力安全委員会決定
一部改訂平成4年6月11日 原子力安全委員会

3. 基準

ECCSは、配管等の破断による原子炉冷却材喪失時に、炉心の冷却可能な形状を維持しつつ、事故を収束させる機能及び性能を有しなければならない。このことを確認するため、想定冷却材喪失事故の解析を行い、次の基準を満足することを示さなければならない。

- (1) 燃料被覆の温度の計算値の最高値は、1,200°C以下であること。
- (2) 燃料被覆の化学量論的酸化量の計算値は、酸化反応が著しくなる前の被覆管厚さの15%以下であること。
- (3) 炉心で燃料被覆及び構造材が水と反応するに伴い発生する水素の量は、格納容器の健全性確保の見地から、十分低い値であること。
- (4) 燃料の形状の変化を考慮しても、崩壊熱の除去が長期間にわたって行われることが可能であること。

ご清聴ありがとうございました。

The End

その他の質疑等に応じて使用する可能性のある資料

第2章 福島第一原子力発電所事故 1～3号機編

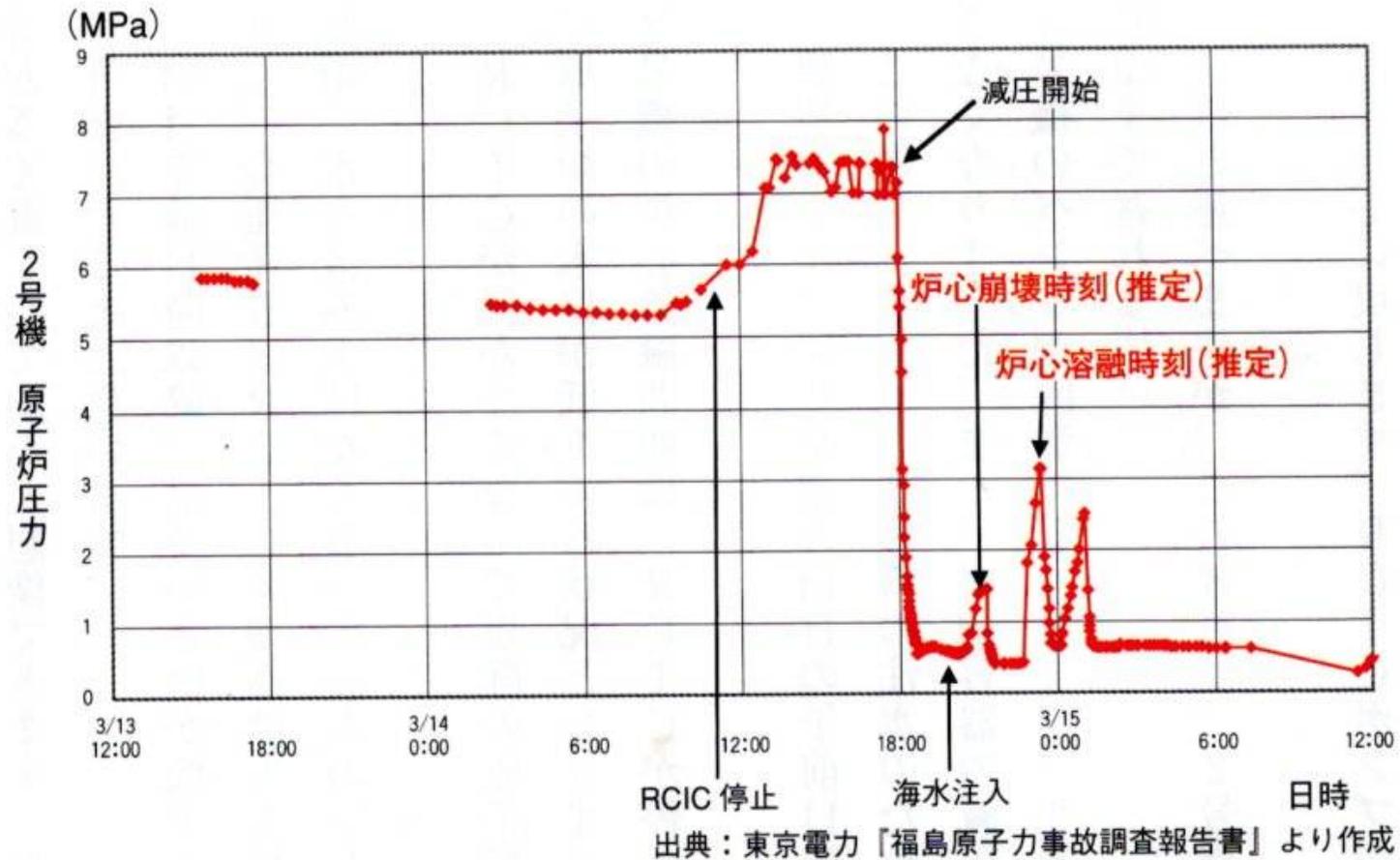
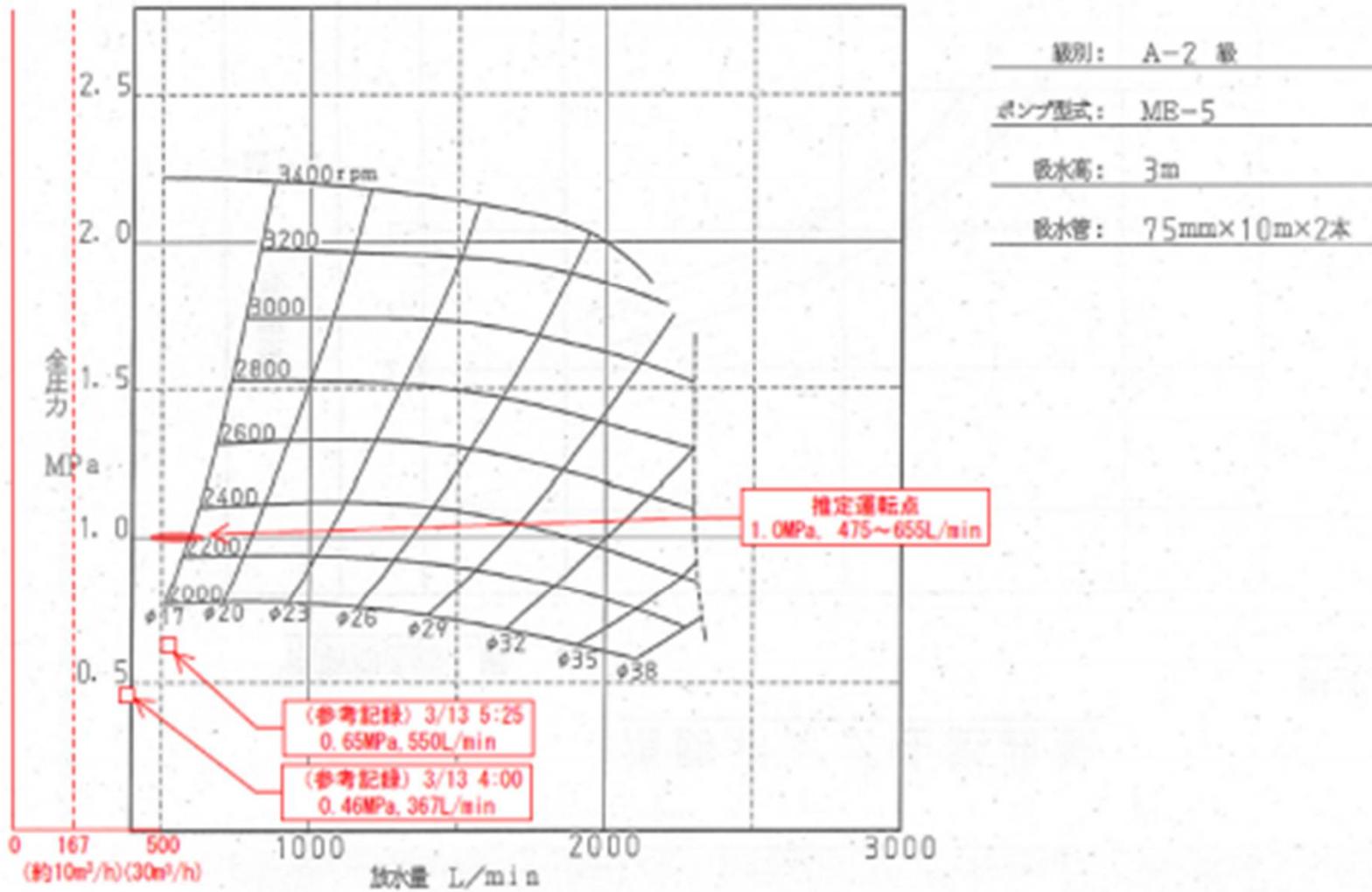


図3 2号機の原子炉圧力変化（測定値）（参考文献1の図1.2.9より）

消防ポンプ性能曲線



〈補足資料〉

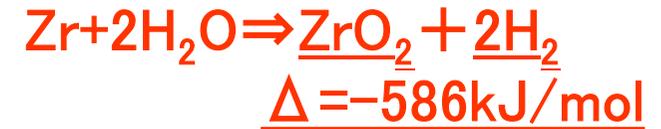
“ジルカロイ・水反応”について

2024年6月20日

日本原子力学会シニアネットワーク会員
エネルギー問題に発言する会会員
牧 英夫

ジルカロイ・水反応による酸化速度の温度依存性

◆ 化学反応式



- ・燃料被覆の脆化
- ・大量の水素発生
- ・大量の反応熱発生

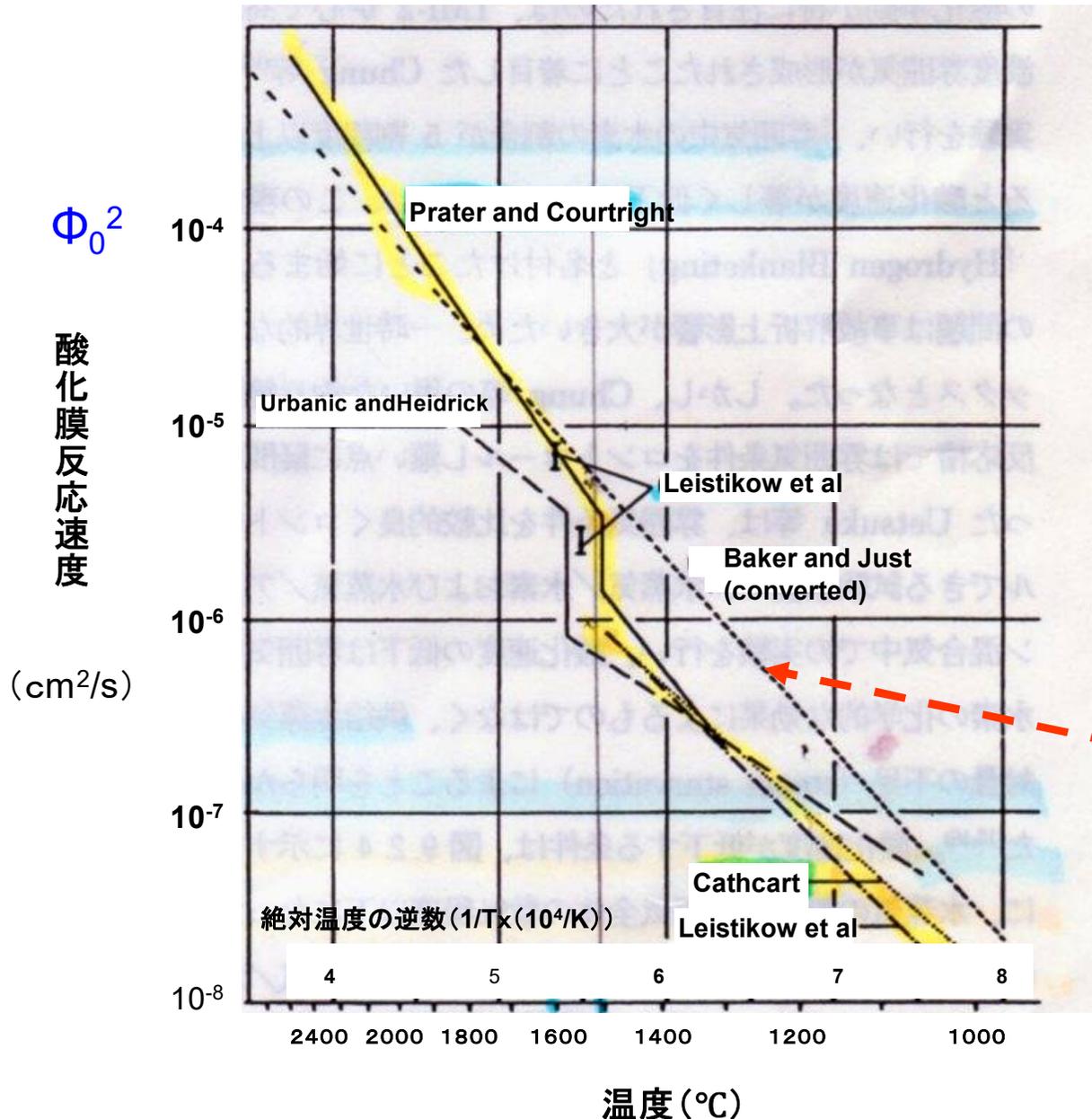
◆ 1960～1980年代に、世界的な規模で研究が行われた。それから45年以上経過した今、その重要性が再認識される。

◆ Baker and Just の式
(代表的反応速度式)

$$w^2 = 33.3 \times 10^6 * t * \exp(-45,500/RT)$$

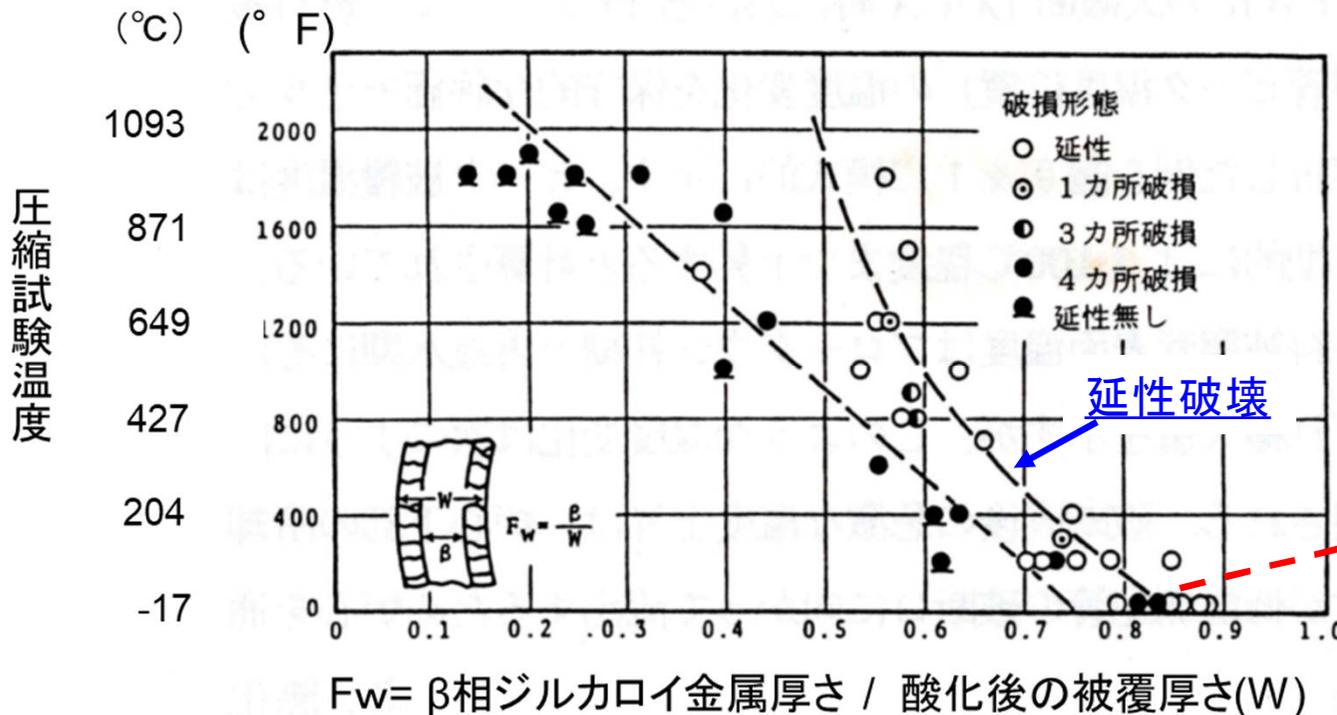
w : 反応量

t : 時間



本指針は1975年に制定された

- ① 燃料被覆管の温度の計算値の最高値は、**1,200°C以下**であること。
- ② 燃料被覆の化学量論的酸化量の計算値は、酸化反応が著しくなる前の被覆管厚さの**15%以下**であること。
- ③ 炉心で 燃料被覆及び構造材が水と反応するに伴い**発生する水素の量**は、格納容器の健全性確保の見地から、十分に低い値であること。
- ④ 燃料の形状の変化を考慮しても、**崩壊熱の除去**が長期間にわたって行われることが可能であること。



米国NRCの技術的結論(1973年)

・LOCA時に燃料被覆が受ける最大のインパクトは再冠水クエンチによる熱衝撃である。

『酸化温度が**1204°C以下**であり、Baker and Justの式で算出した等価被覆酸化量が**17%以下**であれば被覆管の延性が完全に失われることはない。』
(右図にその根拠を示す。)

(参考文献: ORNL-4758
Hobson & Rittenhouse)

中小口径破断LOCA防止基準の重要性

石川論文 第5章 P33~34

『崩壊熱が7%もある大口徑破断LOCAは別として、中小口径破断LOCAの場合は、原子炉停止後2時間を経れば、炉心が持つ崩壊熱は1%以下となるから、溶融炉心が出す崩壊熱も小さい。大口徑破断に較べると数倍小さいから、融点2880°CのUO₂炉心を溶融させるのは不可能である。僕の粗い仮定での計算では、炉心温度を2000°C程に上昇させるのが精一杯である。

これまで軽水炉で起きた炉心溶融事故は、全て崩壊熱で起きたのではなく、崩壊熱で暖められた炉心に、ジルカロイ燃焼が加わって起きたものばかりである。

福島事故は、②「酸化膜厚さ15%以下」、③「ジルカロイ-水反応によって発生する水素量」のルール※を思い起こせという、天の啓示かもしれない。天の啓示は技術的な課題だけではなく、原子力技術の世界的風潮変化に対しても注意を喚起しているように思える。』

(※ “ECCSの性能評価指針”を指す)

超1200°C領域での“ジルカロイ燃焼”

【崩壊熱と反応熱の比較】

- ◆ 1号機では12日0時頃から超1200°C状態となった。
- ◆ 石川論文では、超1200°Cでのジルカロイ・水反応を“ジルカロイ燃焼”と呼んでいる。
- ◆ Baker-Justの式 $w^2 = 33.3 \times 10^6 \cdot t \cdot \exp(-45,500/RT)$ を適用してジルカロイ・水反応速度を試算した。
(w : 単位面積当たりの反応ジルカロイ重量、 t : 時間)

温度 (°C)	A.崩壊熱※1 ($\times 10^6$ J/s)	B.ジルカロイ・水反応 平均発熱量※2 ($\times 10^6$ J/s)	平均発熱量/崩壊熱 (B/A)
1,000	8.3	0.23	0.03
1,100		0.65	0.1
1,200		1.6	0.2
1,300		3.6	0.4
1,400		8.0	1.0
1,500		13	2
1,600		74	9
1,700		136	16
1,800		244	29
1852(MP)		309	37

※1 12日0時頃の崩壊熱を0.6%とした。

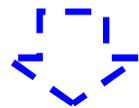
※2 平均発熱量=[ジルカロイ装荷量32tの総発熱量]/[ジルカロイ1mmの酸化時間]

超1200°C炉心に注水するとどうなる？

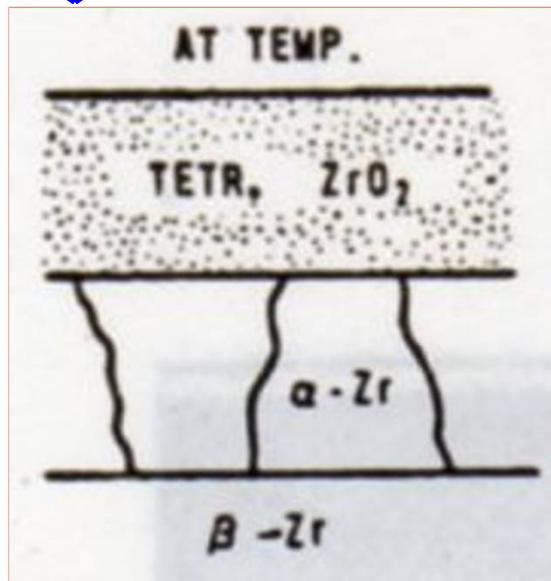
【PBF-PCM実験でのジルカロイ燃焼】

石川論文 3.4節 P16

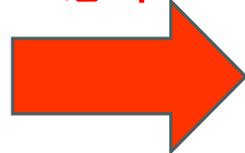
PCM実験は、原子炉の中で燃料棒表面温度を2000°C近辺に加熱して膜沸騰状態におき、15分間その状態を続けた。その間、被覆膜は破れず、少量の放射能が実験ループの中に漏れ出ただけであったという。酸化膜はこれほど強靱なのだ。



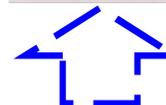
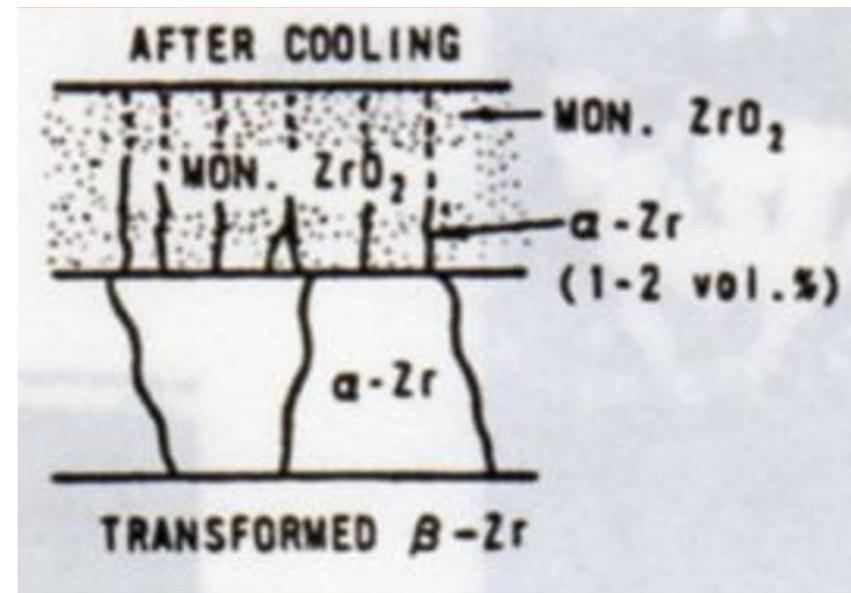
高温保持時



急冷



冷却中(内側は高温のまま)



無数の割れ⇒ジルカロイ燃焼

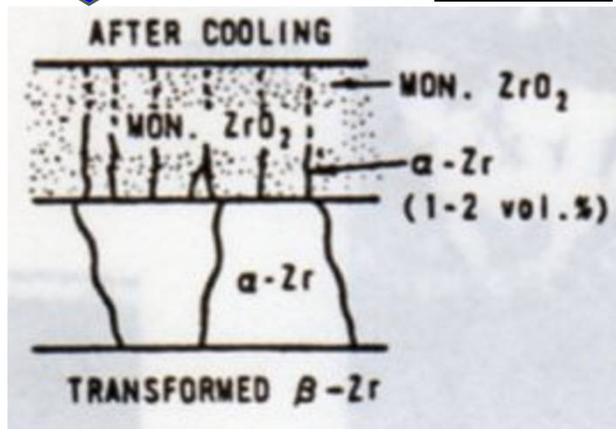
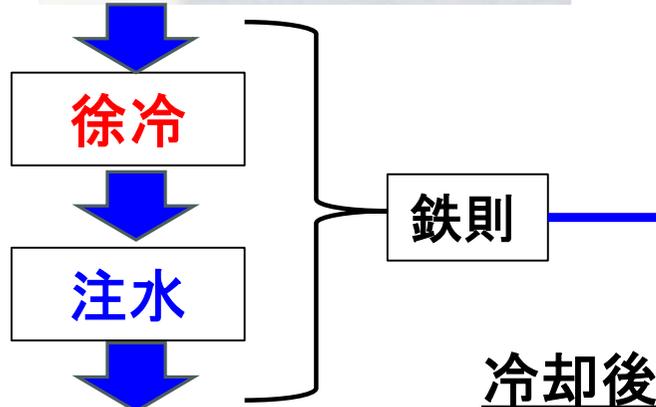
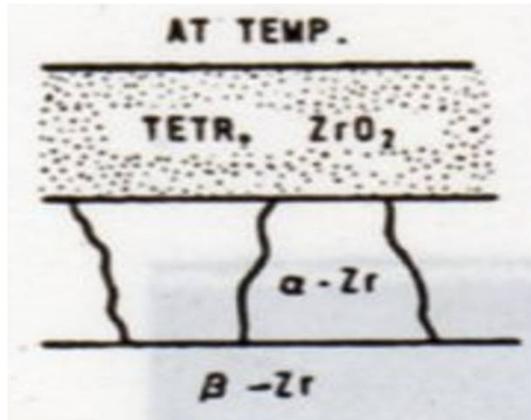
石川論文 3.6節 P17

実験を終えたPBFは、原子炉を停止して、実験ループに水を入れた。途端に、ループの内部の圧力が大きく上昇して、ループへの送水が一時停止した。燃料棒は粉々に壊れて、放射線高のアラームがループに発生した。

中小口径破断LOCA・冷却遅延時の事故拡大防止

石川論文 4.1節 P24～28

超1200°C状態



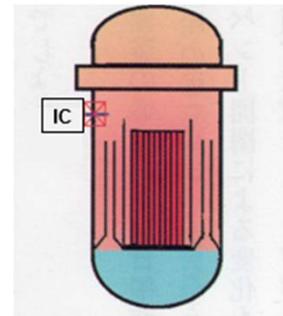
◆ ジルカロイ燃焼防止のため“注水厳禁！”

1号機のジルカロイ装荷量=32トン



- ・ 発生水素量=9000Nm³(PCV体積の1.5倍)
- ・ 発熱量=2x10¹¹J=56MWh

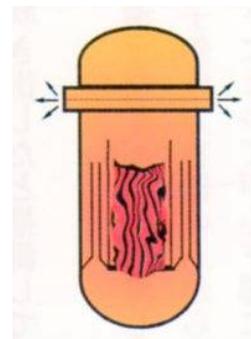
◆ 冷却水が残留 している場合



【手順】

- ・ 格納容器耐圧ベント
- ・ 注水準備の確認
- ・ **原子炉安全弁開放(減圧沸騰冷却)**
- ・ **時間を置かず注水**

◆ 冷却水が枯渇 した場合



【手順】

- ・ 格納容器耐圧ベント
- ・ 加熱蒸気中で**ジルカロイが燃え尽きるまで放置**
- ・ **注水**

ジルカロイ材料技術の再構築

- ◆ 米国海軍Rickover提督指導の基に開発されたジルカロイは、1950年代初頭に**ノーチラス号の燃料被覆管**として使用された。
- ◆ ジルカロイは、“**中性子吸収断面積が小さいこと**”、“**冷却水中の耐食性に優れていること**”、“**UO₂燃料との両立性がよいこと**”、“**適度な機械的強度を有すること**”など、他の材料では求めえない特性を有している。
このため、軽水炉の主要炉心材料として世界中で使用され、国内のジルカロイ産業も確立された。
- ◆ しかし、福島第一原子力発電所事故を境に燃料材料の開発は、**事故耐性燃料材料**を求める流れとなり、ジルカロイ産業界も活動を停止したままである。
事故耐性燃料材料開発は、その成否は不明であり、成功するとしても、大規模かつ長期間を必要とする。
- ◆ 今後ともジルカロイ依存時代は長期化する。
重要炉心材料の安定調達と軽水炉安全確保のために、ジルカロイ産業と材料技術の強化が望まれる。

NRA の新規規制基準における深層防護の考え方と ジルカロイ・水反応に対する基準に対する問題提起（私見）－その１－

川上 博人

深層防護	安全確保の考え方	安全規則の概要とジルカロイ・水反応に係る基準	現行基準に対する問題提起
第3層 DBA 段階	単一故障基準条件下（第12条）で、燃料の著しい損傷防止	<ul style="list-style-type: none"> ● ECCS の設置（第19条） <ul style="list-style-type: none"> ➢ 一次冷却材を喪失した場合においても、燃料被覆材の温度が燃料材の溶融又は燃料体の著しい損傷を生ずる温度を超えて上昇することを防止できるものとする ➢ 一次冷却材を喪失した場合においても、燃料被覆材と冷却材との反応により著しく多量の水素を生じないものとする ➢ 上記の判断基準はECCS性能評価指針による。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ECCS性能評価指針の付録に定める金属－水反応の反応速度と反応熱に係る評価式の適用限界の明確化（高温に至った後に、冷水で急冷した場合の亀裂進展の影響には別途配慮が必要であること等追記が必要）
第4層 重大事故段階	DBA 対処設備機能喪失時（前段否定の条件）に基づく重大事故等の拡大の防止	<ul style="list-style-type: none"> ● DBA等対処設備が機能喪失した場合においても以下の要件を満足すること（第37条） <ul style="list-style-type: none"> ➢ 炉心の著しい損傷の防止基準 <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料被覆管の最高温度が1,200℃以下であること ・ 燃料被覆管の酸化量は、酸化反応が著しくなる前の被覆管厚さの15%以下であること ➢ 原子炉格納容器の破損防止 <ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下又は酸素濃度が5vol%以下であること <p style="text-align: center;">別途炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイドを制定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ DBA等対処設備と同一の基準適用の是非（DBA等対処設備の機能喪失が前提であるので、ECCS性能評価指針は超えた状態にあることを否定できない。燃料の著しい損傷防止基準と炉心の著しい損傷の防止基準が同一基準は論理的に整合していない。）

NRA の新規制基準における深層防護の考え方と ジルカロイ・水反応に対する基準に対する問題提起（私見）－その２－

深層防護	安全確保の考え方	安全規則の概要とジルカロイ・水反応に係る基準	現行基準に対する問題提起
第4層 重大事故 段階 (続)	前段否定1 著しい炉心損傷防止及び格納容器破損防止	<ul style="list-style-type: none"> ● DBA等対処設備が機能喪失した場合を想定してECCSの代替設備を設けること（第45条～第49条） <ul style="list-style-type: none"> ➢ 可搬型重大事故防止設備 ➢ 現場操作に必要な設備 ➢ 常設重大事故防止設備（時間的余裕のない場合） ➢ 代替設備（可搬型重大事故防止設備が設置できない場合） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ECCSと同一機能の代替設備を要求する以前に、ECCS性能評価指針を超える高温状態に至った場合の冷水による急冷禁止と徐冷に関する運転規定を設ける必要がある。 （冷水注水は場合によっては火に油を注ぐようなもの）
	前段否定2 格納容器破損及び著しい放出防止	<ul style="list-style-type: none"> ● 著しい炉心損傷が発生した場合においても格納容器破損及び著しい放出防止するために必要な設備を設けること（第50条～第53条） <ul style="list-style-type: none"> ➢ 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備 ➢ 原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備 ➢ 水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備の設置 （格納容器破損防止対策有効性評価審査ガイドを策定し、全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応するものとして対策） <ul style="list-style-type: none"> ・ 水素濃度制御設備 ➢ 水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備の設置 <ul style="list-style-type: none"> ・ 水素ガスを排出することができる設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷水により急冷したような場合のジルカロイ・水反応の反応速度や反応量を定量的に規定するためには、福島事故の分析及び実験データの更なる拡充が必要である。 （全炉心内のジルコニウム反応量や水素濃度制御装置に対する仕様等に対する定量的規定のためにはデータが必要）
	前段否定3 工場等外への放射性物質の拡散抑制	<ul style="list-style-type: none"> ● 炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損に至った場合においても工場等外への放射性物質の拡散抑制（第55条） <ul style="list-style-type: none"> ➢ 原子炉建屋放水設備 	