

# 原発事故シミュレーションと「想定外」

牧野淳一郎

東京工業大学理工学研究科  
理学研究流動機構

科学技術インタープリター養成プログラム第6回公開シンポジウム  
「三大災害と科学コミュニケーションの問題 地震・津波・原子力発電所事故」  
2011/10/8

スライド: [jun.artcompsci.org/talks/index-j.html](http://jun.artcompsci.org/talks/index-j.html) にあるはず  
私のところは写真撮影・録音・実況等なんでも OK

# はじめに：牧野って誰？

- 職歴

2011/4- 東工大理学研究流動機構 教授

2006/6- 国立天文台理論研究部 教授

1999/4- 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 助教授

天文(天体物理)学者？

- 学歴

1990/3 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了

1987/3 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻修士課程修了

1985/3 東京大学教養学部基礎科学科第二卒業

# 牧野って誰？(続き)

研究はどんなことをやってきたか

- 主に理論・シミュレーションによる天体形成・進化の研究
  - \* 大規模構造の形成・銀河形成
  - \* 銀河中心・球状星団の力学進化
  - \* 惑星形成
- シミュレーションのための計算アルゴリズムの研究
- シミュレーションのための計算機の開発

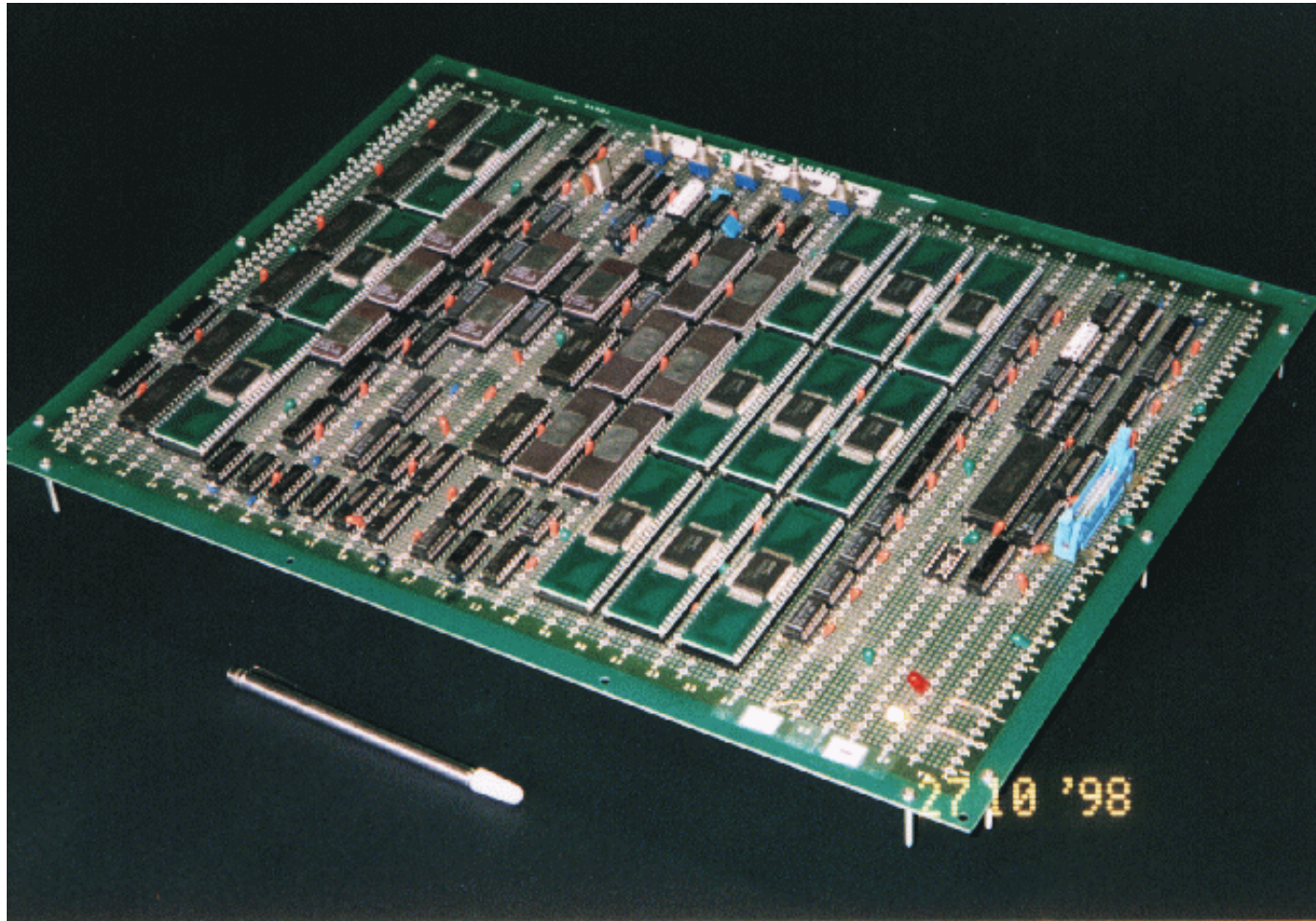
銀河合体

# 計算機開発

20年くらいいたらやらやっている。

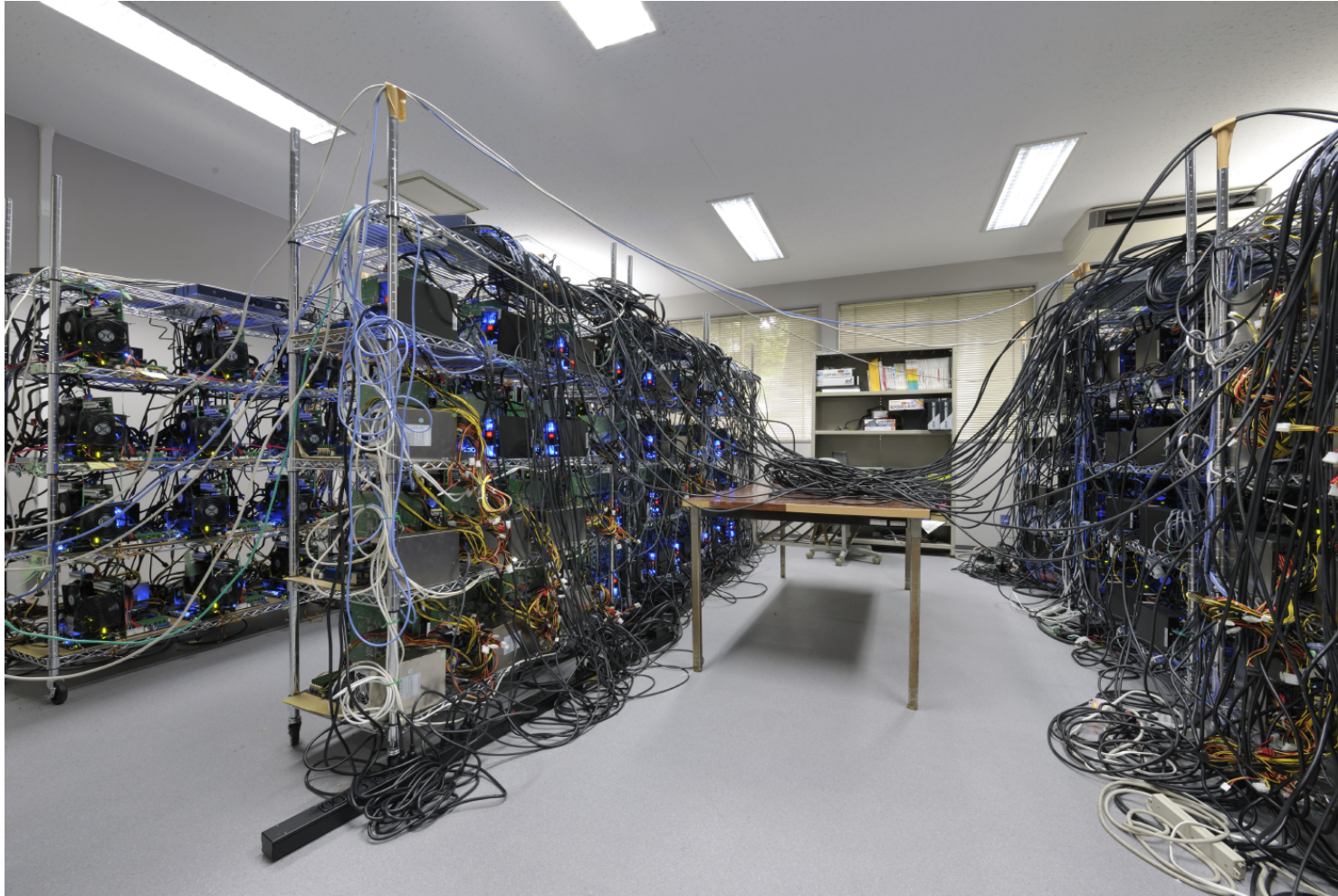
- 1989- GRAPE (Gravity PipE):  
重力多体問題専用計算機
- 2004- GRAPE-DR (Greatly Reduced Array of Processor Element with Data Reduction):  
「汎用」アクセラレータ

# GRAPE-1(1989)





# GRAPE-DR クラスタシステム (2008)



と、前置きはこれくらいにして

何がいらなかったか:

と、前置きはこれくらいにして

何が良かったか:

牧野は別に原子炉工学の専門家でもなん  
でもない



# では何故福島の話をする羽目に？

多分こうかなと勝手に思っている理由:

- 「専門家」からまともな情報発信がない
- 隣接分野の研究者からの情報発信も結構アレなものがおおかった

# というわけで：今日の話の構成

- 3/11-18 における (当時の報道・発表資料による) 事故の進展
- 原子力安全基盤機構のシミュレーション結果 (電源喪失以降)
- 原子力安全基盤機構のシミュレーション結果 (津波)
- 「現時点」での「事実」と思われるもの
- 「科学者からの情報発信」

# 3/11-18 における (当時の報道・発表資料 による) 事故の進展 (1) 3/11

3/11 18:28 時事通信

経済産業省原子力安全・保安院によると、11日午後の地震の影響で、福島第一原発の原子炉を冷却するための機能が作動していないという。

3/12 1:52 朝日

東日本大震災で、炉心を冷やす緊急炉心冷却システム（ECCS）が動かなくなった福島第一原子力発電所の1号機について、東京電力は12日未明、原子炉格納容器の圧力が高まっているため、容器内の放射能を含む蒸気を放出する作業を検討していることを明らかにした。

# 3/12

3/12 NHK (記事は消えています)

- セシウム 137 を建屋の外で検出
- 核燃料棒を束ねた「燃料集合体」が、最大で1メートル70センチほど露出している

15:30 1号機の爆発



朝日 3/12 19:11

一方、保安院によると、爆発音のあった後に、1号機の原子炉格納容器の圧力が急激に下がってきたという。格納容器の破損を防ぐため、弁を開けて内部の空気を抜く作業が効果を上げたのか、他の要因かは不明だ。

空気とともに容器内の放射性物質も外部に放出されたとみられ、放射線の観測値は上昇している。

# 3/13

以下読売の見出しだけ

- 福島第一原発事故、深刻度「レベル4」以上か（3月13日 01:51）
- 原発海水注入「あと数時間で満杯」福山副長官（3月13日 03:46）
- 福島第一3号機、圧力下げる弁の開放に成功（3月13日 09:59）
- 福島第一3号機、冷却水位下がり燃料棒が露出（3月13日 12:57）
- 福島第一3号機も原子炉に海水注入開始（3月13日 15:05）
- 福島第一3号機建屋も水素爆発の恐れ（3月13日 23:48）

# 3/14

- 福島第二原発 1・2号機、冷却システム回復 (3月14日 10:36)
- 福島第一原発の半径20km住民に屋内退避指示 (3月14日 11:45)
- 爆発の3号機、格納容器は健全...枝野官房長官 (3月14日 11:51)
- 爆発3号機、放射性物質拡散の恐れも (3月14日 11:55)
- 爆発3号機、中性子計測されず...東電 (3月14日 12:07)
- 爆発した3号機、放射線量は小さな程度 (3月14日 12:24)
- 原発3号機も水素爆発、炉心溶融の可能性 (3月14日 13:20)
- 福島第一2号機も冷却機能が停止 (3月14日 15:24)
- 米空母のヘリ乗員17人から放射線検出 (3月14日 19:39)
- 東電「海水注入で炉内水位上昇」...第一2号機 (3月14日 20:58)

# 3/15

- 福島第一 2 号機、燃料棒すべて露出...冷却水消失 (3月15日 02:38)
- 福島第一原発正門で中性子線検出、3号機からか (3月15日 03:30)
- 福島第一原発 2 号機、水位回復せず...空だき続く (3月15日 07:34)
- 福島第一原発 2 号機で水位回復、露出 2・8 m (3月15日 08:52)
- 爆発音の 2 号機、何が起きた? ...専門家の見方 (3月15日 11:08)
- 福島第一 4 号機で火災、爆発音も...屋根には損傷 (3月15日 11:46)
- 福島原発近くの風向きは北関東方向へ (3月15日 12:08)
- 爆発の 2 号機、燃料棒が 2 度にわたり完全露出 (3月15日 14:02)



# 3/16

- 福島第一 1 号機、核燃料の 7 割破損...東電試算 (3月16日 03:09)
- 第一原発事故はレベル 6 または 7 ...米機関が見解 (3月16日 09:56)
- 福島第一原発で放射線上昇、自衛隊ヘリで消火へ (3月16日 13:26)
- 炉心冷却装置の復旧へ、新送電線着工 (3月16日 14:31)

## 3/17-18

- 東電謝罪、2号機の異常データは単位換算ミス（3月17日 01:19）
- 警視庁高圧放水車投入へ...冷却水枯渇止める！（3月17日 06:52）
- 陸自へり、3号機に水投下...海水くみ上げ4回（3月17日 09:55）
- 4号機プール内に大量の水、自衛隊へり確認（3月17日 13:01）
- 冷却装置回復へ、原発に送電線引き込み工事開始（3月17日 13:25）
- 福島第一原発の深刻度「レベル5」に引き上げ（3月18日 18:01）

# 当時私が思ったこと

3/11: ECCS が動作しなくなった → 炉心溶融は避けられないのではないか？

3/12: 1号機水素爆発「格納容器は爆発していない」→ ？

3/13: 3号機「水素爆発」「格納容器は爆発していない」→ ???

- 原子炉は本当はどうなってるんだろう？(本当は壊れてんじゃないのか？)
- 一体どれだけの放射性物質がどんなふうに出たんだろう？(すごい量の放射性物質が出てるんじゃないか？)

# 原子力安全基盤機構の シミュレーション結果

10 原シ報 - 0003  
JNES/NSAG10 - 0003

平成21年度  
地震時レベル2 P S Aの解析 (BWR)

平成22年10月

独立行政法人 原子力安全基盤機構

3/13 に BWR の構造、事故のモデル  
とかの資料がないかと調べていたら、  
原子力安全基盤機構の報告書というの  
を見つけた。

# 原子力安全基盤機構報告書サイト(1)



JNESのご紹介



広報誌・年報



技術情報



情報公開・提供

## 技術情報



[ホーム](#) > [技術情報](#) > [成果報告書](#) > 原子力システム安全部の一覧  
2009年度

このページを印刷する 

[成果報告書に戻る](#)

### 原子力システム安全部の一覧 2009年度

#### 報告書表題【平成21年度】

BWR プラント統計的安全評価手法の整備 = 不確かさ解析機能の組み込みと実機ベンチマーク問題解析 =

#### 報告書

10原熱報  
-0001

#### ダウンロード

[目次](#)  
[全文](#)  
(4.60MB)

三次元核熱動特性解析コードによるRIA 解析機能の整備

10原熱報  
-0003

[目次](#)  
[全文](#)  
(2.12MB)

#### ● 技術情報

- 検査等の結果
  - ▶ 定期安全管理審査の結果
  - ▶ 検査等実績
- 保安活動総合評価結果
- 規格基準整備
  - ▶ 発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令と解釈に対する解説
  - ▶ 学協会規格の技術評価
  - ▶ IAEA安全基準邦訳データベース
- トピカルレポートの技術評価
- 安全研究計画

# 原子力安全基盤機構報告書サイト(2)

地震時レベル2PSA 手法の整備 (PWR)	10原シ報 -0002	<a href="#">目次</a> <a href="#">全文</a> (3.39MB)
地震時レベル2PSAの解析(BWR)	10原シ報 -0003	<a href="#">目次</a> <a href="#">全文</a> (5.13MB)
地震時のレベル3PSAの検討 = 不確かさ解析手法の検討 =	10原シ報 -0004	<a href="#">目次</a> <a href="#">全文</a> (1.74MB)
シビアアクシデント時原子炉冷却系内多次元熱流動及びFP挙動解析	10原シ報 -0005	<a href="#">目次</a> <a href="#">全文</a> (6.68MB)
シビアアクシデント時格納容器内多次元熱流動及びFP挙動解析	10原シ報 -0006	<a href="#">目次</a> <a href="#">全文</a> (5.36MB) <a href="#">付録</a> (2.29MB)

「地震時レベル2PSAの解析(BWR)」

# 「地震時レベル2PSAの解析」って何？

- 「地震時」これは意味は明快
- 「レベル2」これはなんか知らないけどとりあえず知らなくても大丈夫そう？
- 「PSA」???

PSA: 「確率的安全評価」

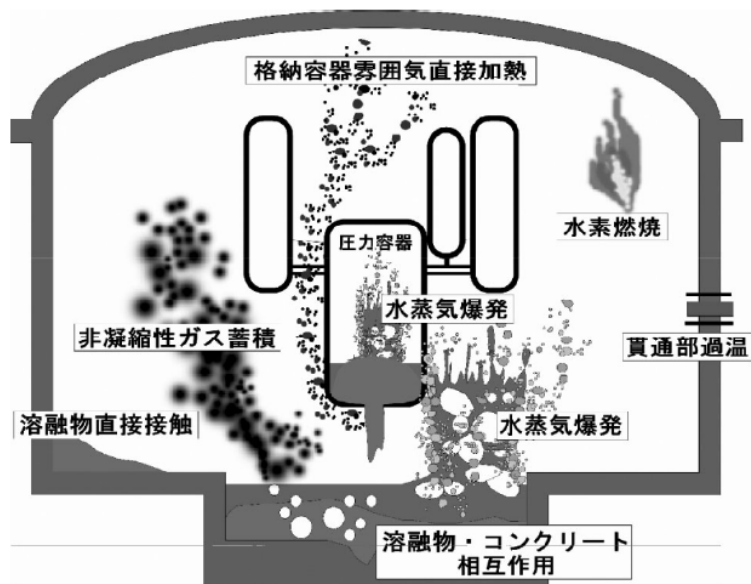
大雑把にいうと、起こりそうな事故シーケンスについて、その確率を評価する。

評価する方法: 基本的には数値シミュレーション (実験なんかできない)



# 解説記事から

連載講座「軽水炉の確率論的安全評価 (PSA) 入門」第5回 内的事象レベル2PSA (梶本、日本原子力学会誌 2006, Vol 48, No 8)



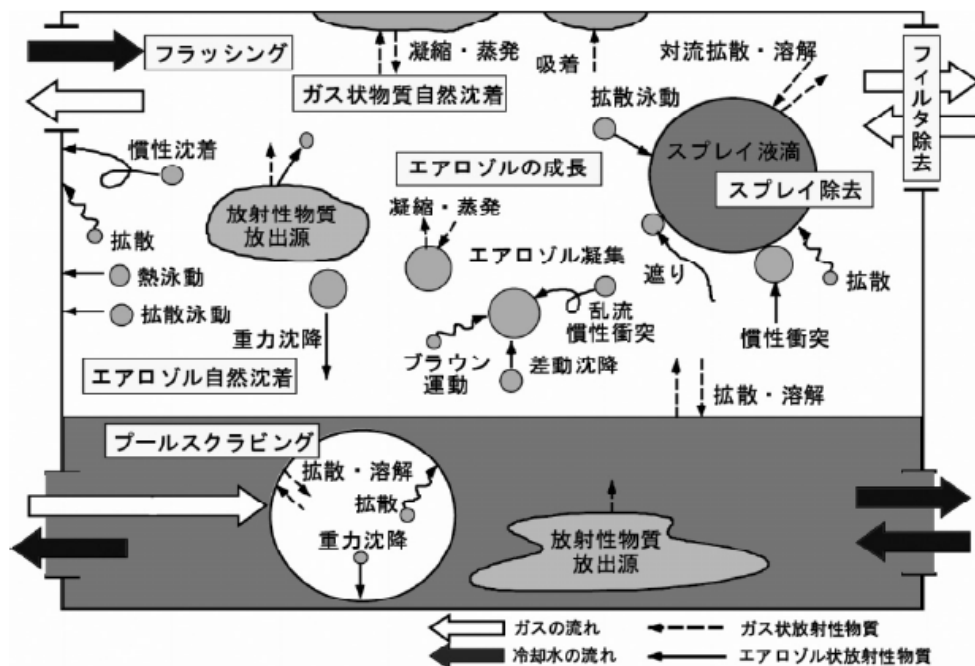
解析対象になるプロセス:

炉心損傷(燃料溶融)の後に起こると想像されるいろんなもの。

水蒸気爆発、水素爆発、格納容器破壊、等。

# 解説記事から (2)

放射性物質の挙動 本文から:



炉心が著しく損傷すると、希ガス、ヨウ素、セシウム等の揮発性の高い放射性物質が、燃料から原子炉冷却系へ放出される。ヨウ素またはセシウムは、CsI または CsOH 等の化合物を形成して蒸気圧が低下し、原子炉冷却系配管部に運ばれる頃には大部分がエアロゾル化する。

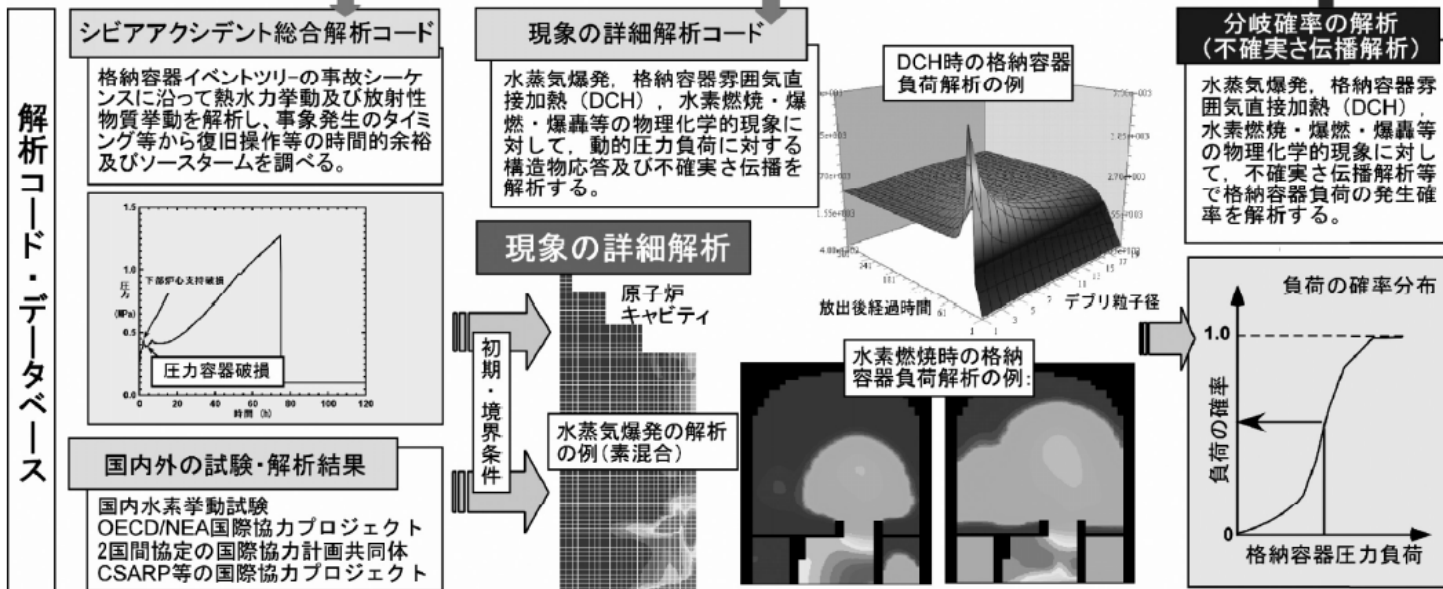
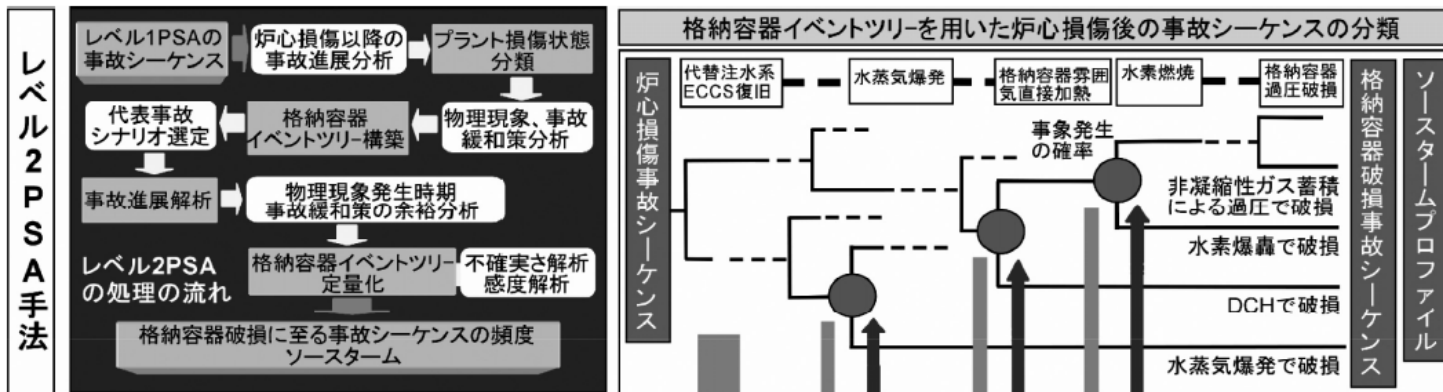
ストロンチウム等の難揮発性の物質は、高温領域でもエアロゾルになる。

## 解説記事から (3)

このような放射性物質を含むエアロゾルの一部は，雰囲気ガスの流れで原子炉冷却系内を移動して，配管破断口または弁開口部から格納容器雰囲気中へ放出される。一部のエアロゾルは，重力沈降，熱泳動，拡散泳動，慣性衝突等によって構造物および配管表面等に沈着する。

原子炉圧力容器が破損して溶融物が格納容器に流出する状況になると，溶融物とコンクリートとの反応に伴って，溶融物から放射性物質が放出される。これらの放射性物質を含むエアロゾルは，凝集によって粒子径が急速に大きくなり，構造物表面へ沈着する。

# 計算機シミュレーション



# というわけで

レベル2PSA 解析:簡単にいうと、

代表的なイベントツリーにそってイベントの詳細な数値解析をして、  
どんなふうに原子炉が破壊されてどれくらいの放射性物質がでるかを  
予測する

シミュレーションには 1970 年代からの歴史があり、 BWR 電源喪失については基本的に同じ結果が当初から得られているが、今日は安全基盤機構の最新レポートベースで。

# 解析対象になっていた原子炉

- BWR-3
- BWR-4 (50万kW 電気出力) (1号機?)
- BWR-4 Mark-I (福島第一 2-4号機)
- BWR-5 Mark-II (福島第一 5,6号機?)
- ABWR RCCV(浜岡5号機)

# BWR-4 (50万kW電気出力) の代表的事故シーケンス

- 電源喪失 (TBU)
- インターフェース LOCA(V)
- 大 LOCA 時未臨界確保失敗 (AC)
- 小 LOCA 時未臨界確保失敗 (S2C)

LOCA: Loss of Coolant Accident, 原子炉冷却材喪失事故



# ちなみに：インターフェースLOCAとは

余熱除去系統は、余熱除去ポンプ、燃料取替用水タンク、配管、弁等からなる。今、何らかの理由によりRCSと余熱除去系との間の圧力バウンダリを構成する隔離弁が破損あるいはリークし、RCSの高い圧力が、耐圧の低い余熱除去系配管にかかり、その配管の破断が格納容器外で生じる事故を考える。これは余熱除去系隔離弁破断LOCA（インターフェイスLOCA）と呼ばれる。事故発生後、原子炉は制御棒挿入により停止するが、冷却材が格納容器の外で漏れいしているため格納容器再循環サンプに水が溜まらず、再循環運転ができない、さらに、余熱除去系配管破断のため低圧注入系が使えない、と仮定する。

(東大工学部レポート課題から)

# シミュレーション可視化の例

動画で見る炉心溶融

独立行政法人・原子力安全基盤機構が事故前に、原子力防災専門官向け資料として作成していた、炉心溶融のシミュレーション画像。

# 原子炉の構造

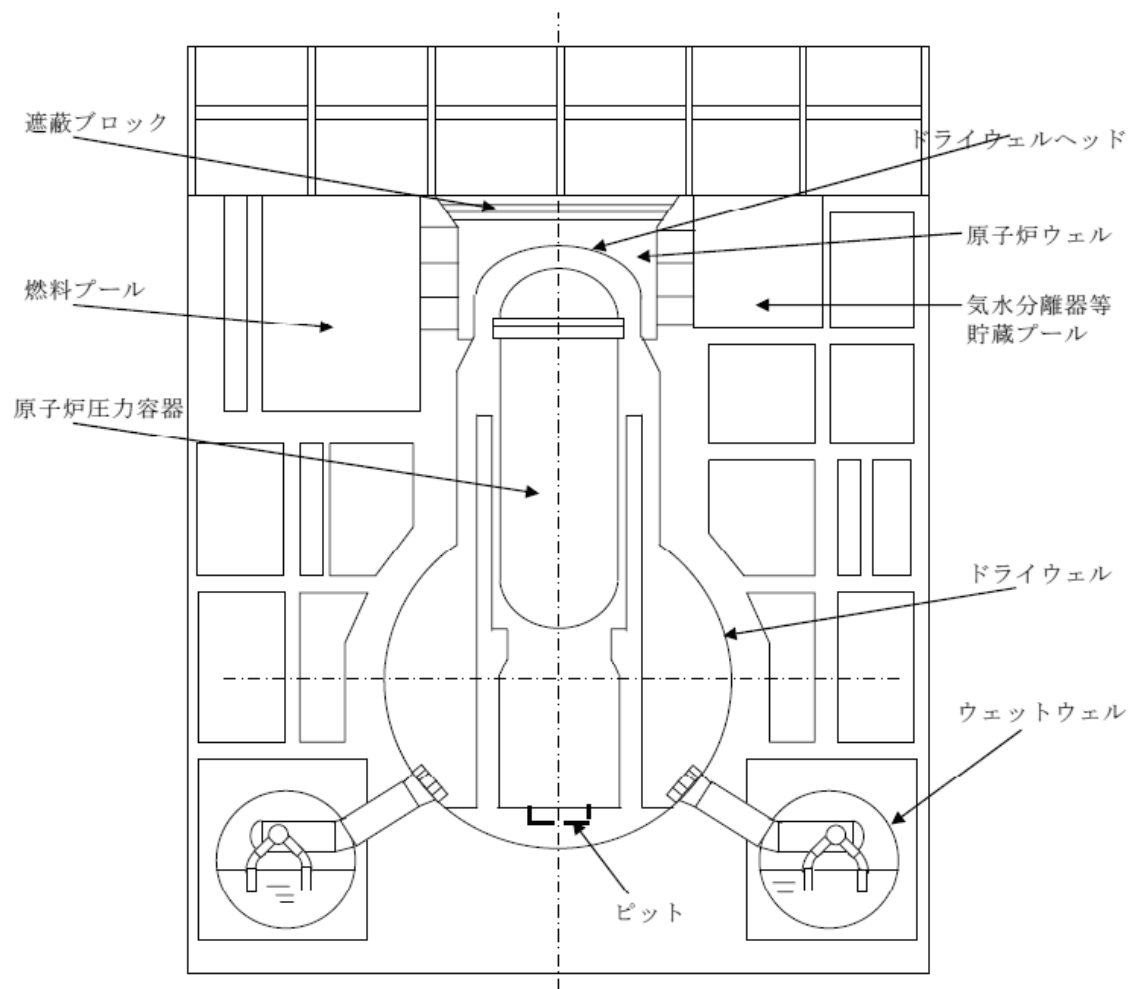
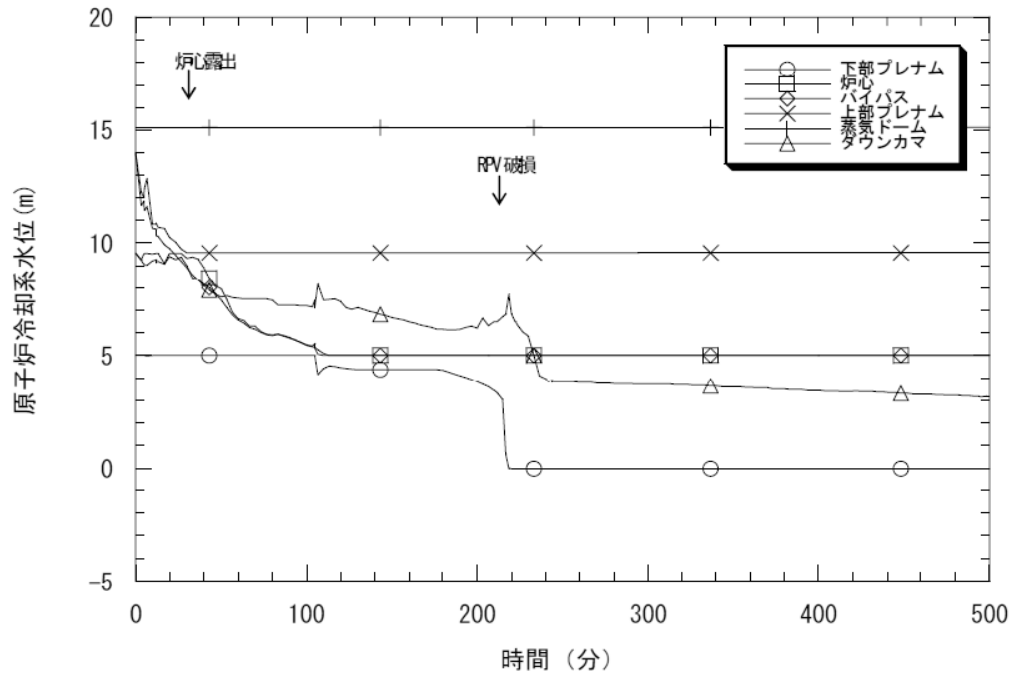


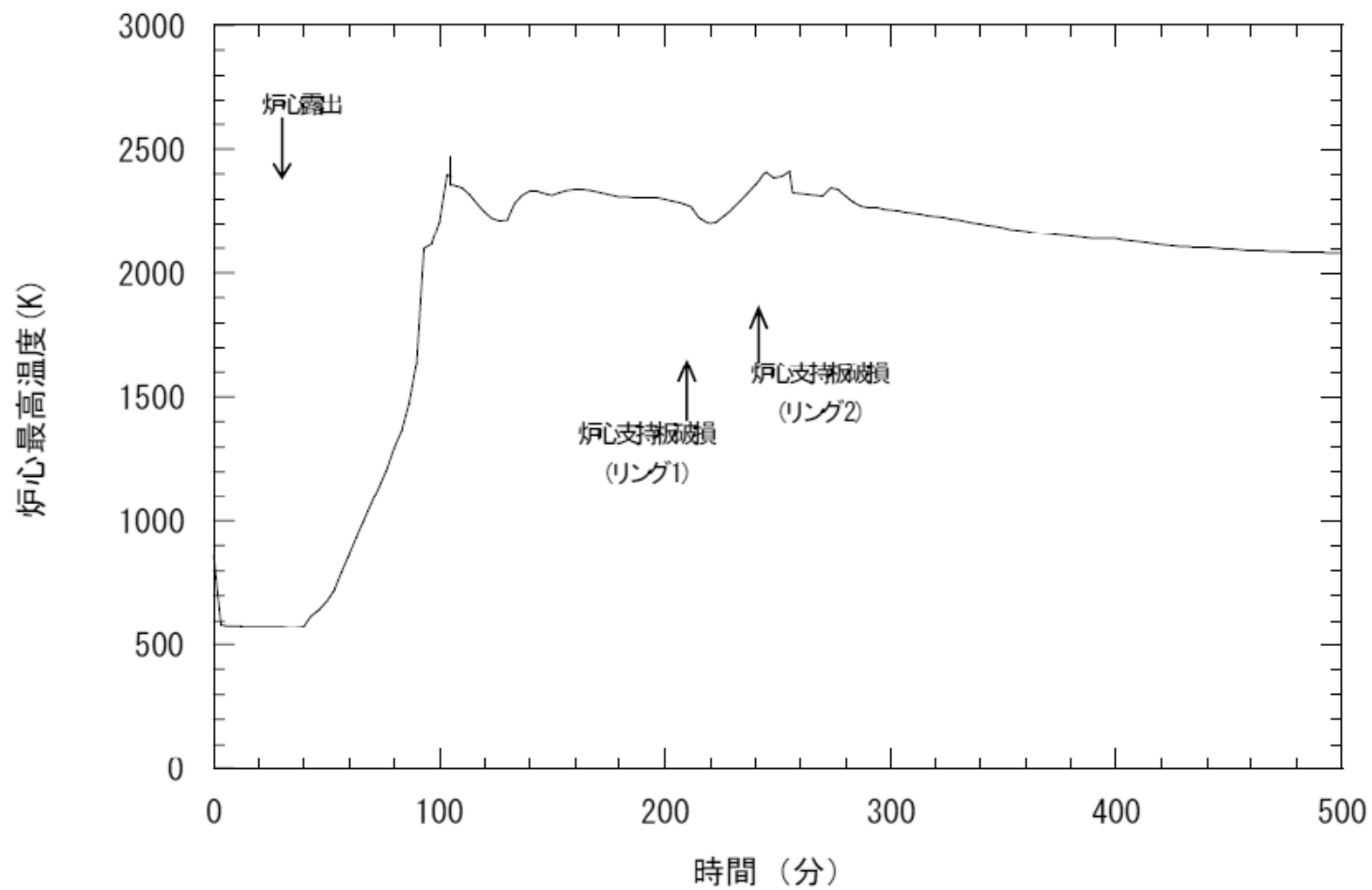
図 2.6 BWR-4 MarkI 型の原子炉建屋概要図

# 電源喪失のシミュレーション結果詳細 (BWR-4の場合)

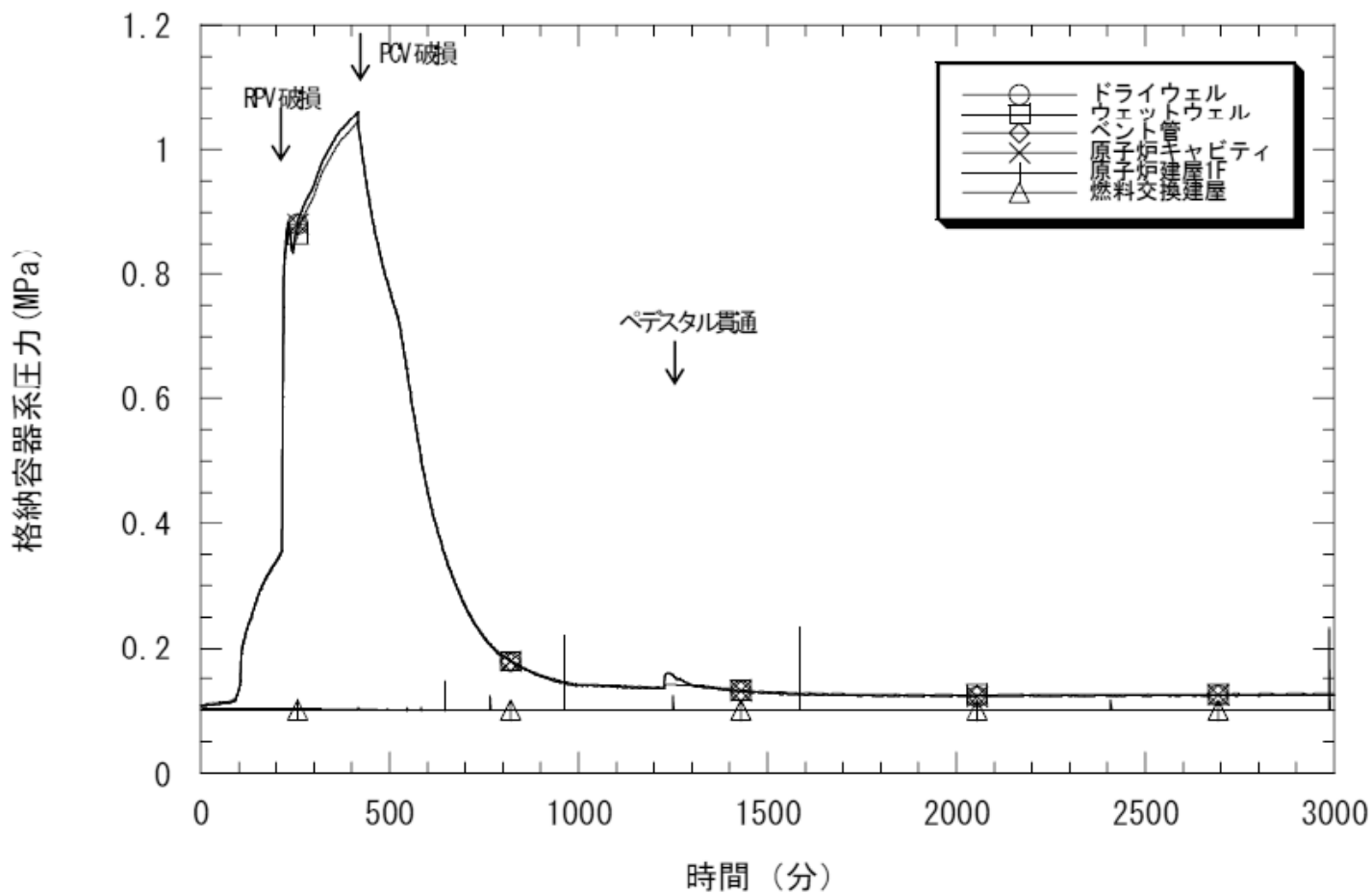


- 1 時間で炉心露出
- 3 時間で圧力容器破壊

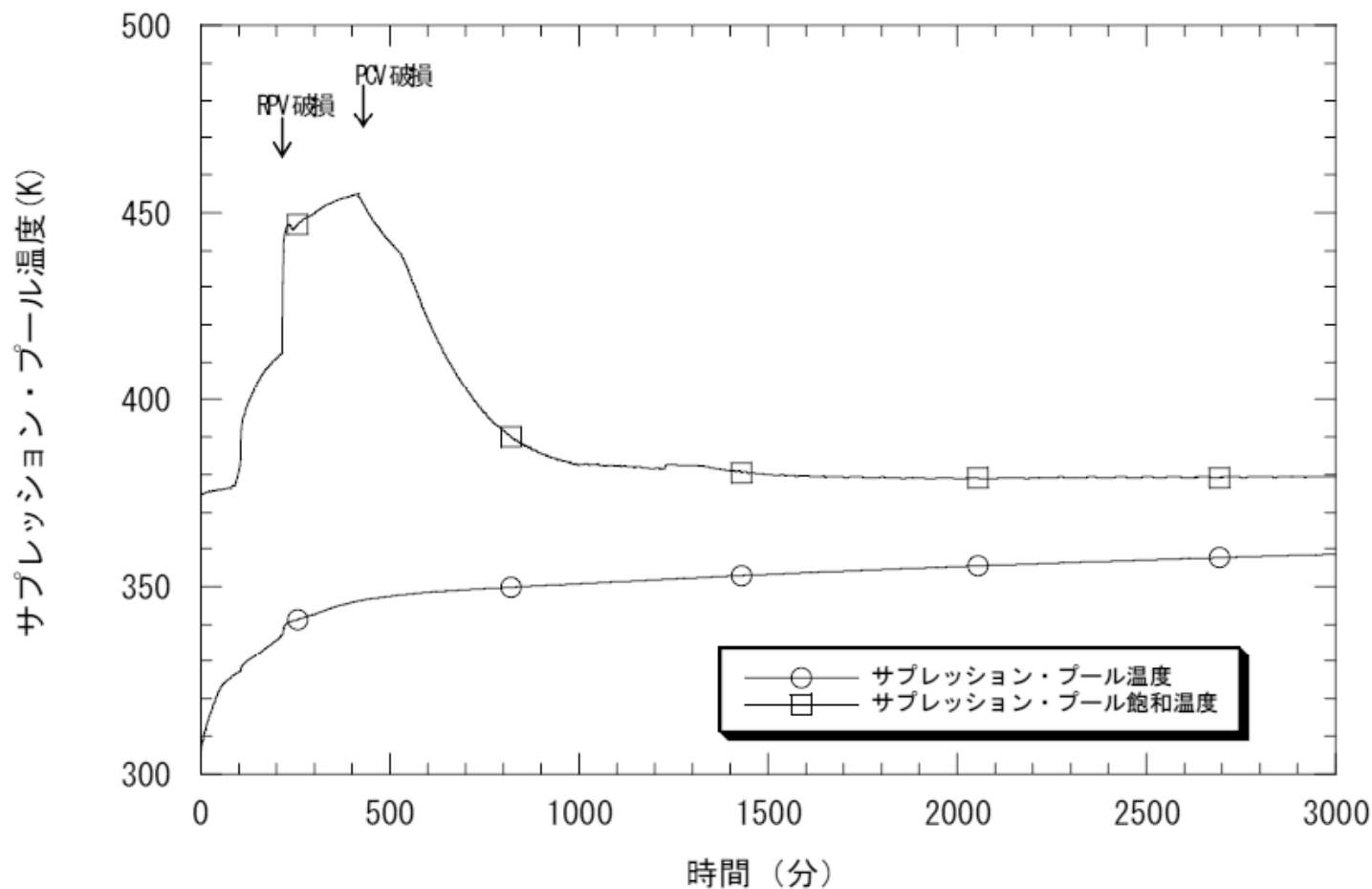
# 炉心温度



# 格納容器圧力

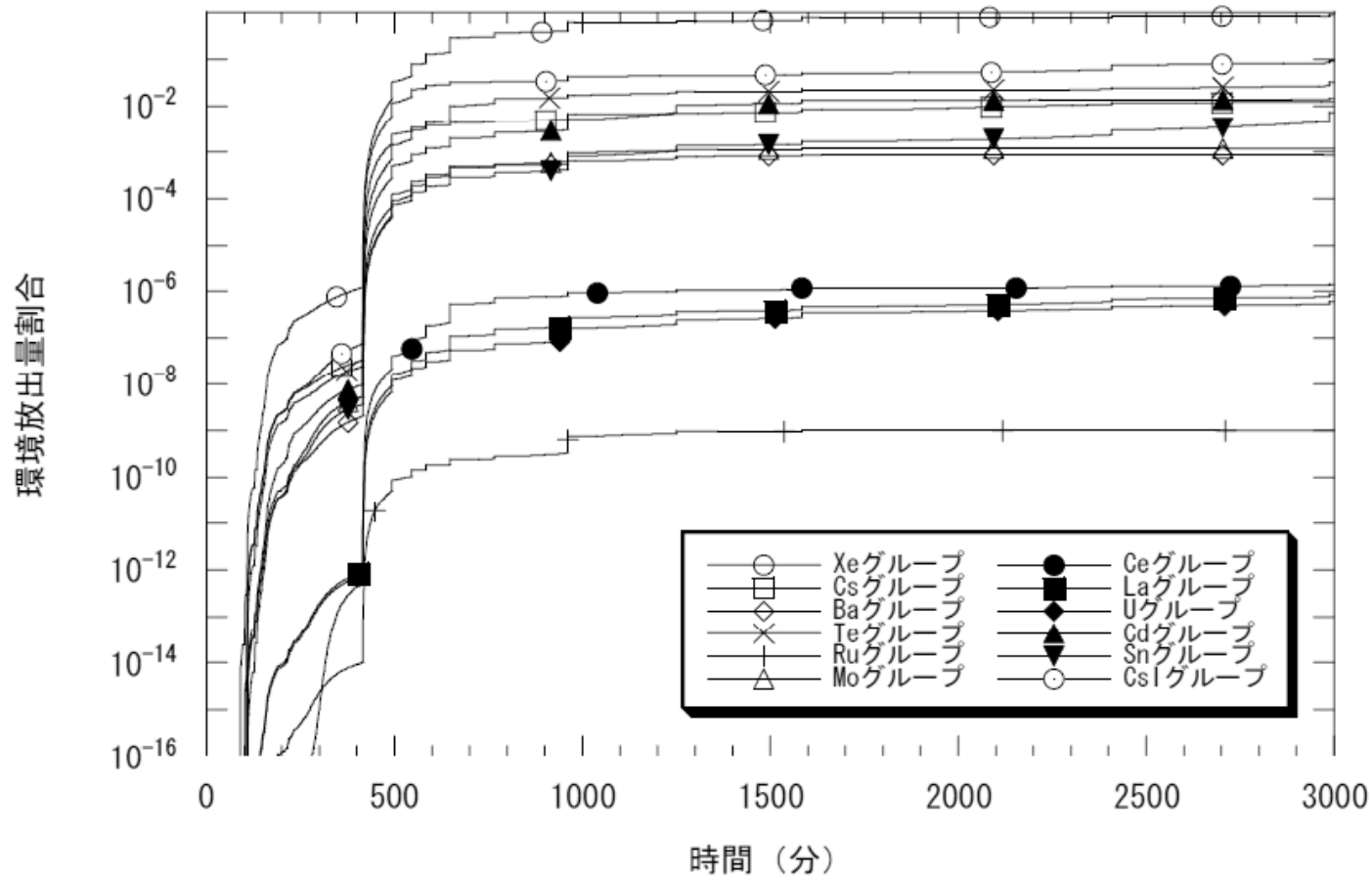


# サブプレッションプール温度

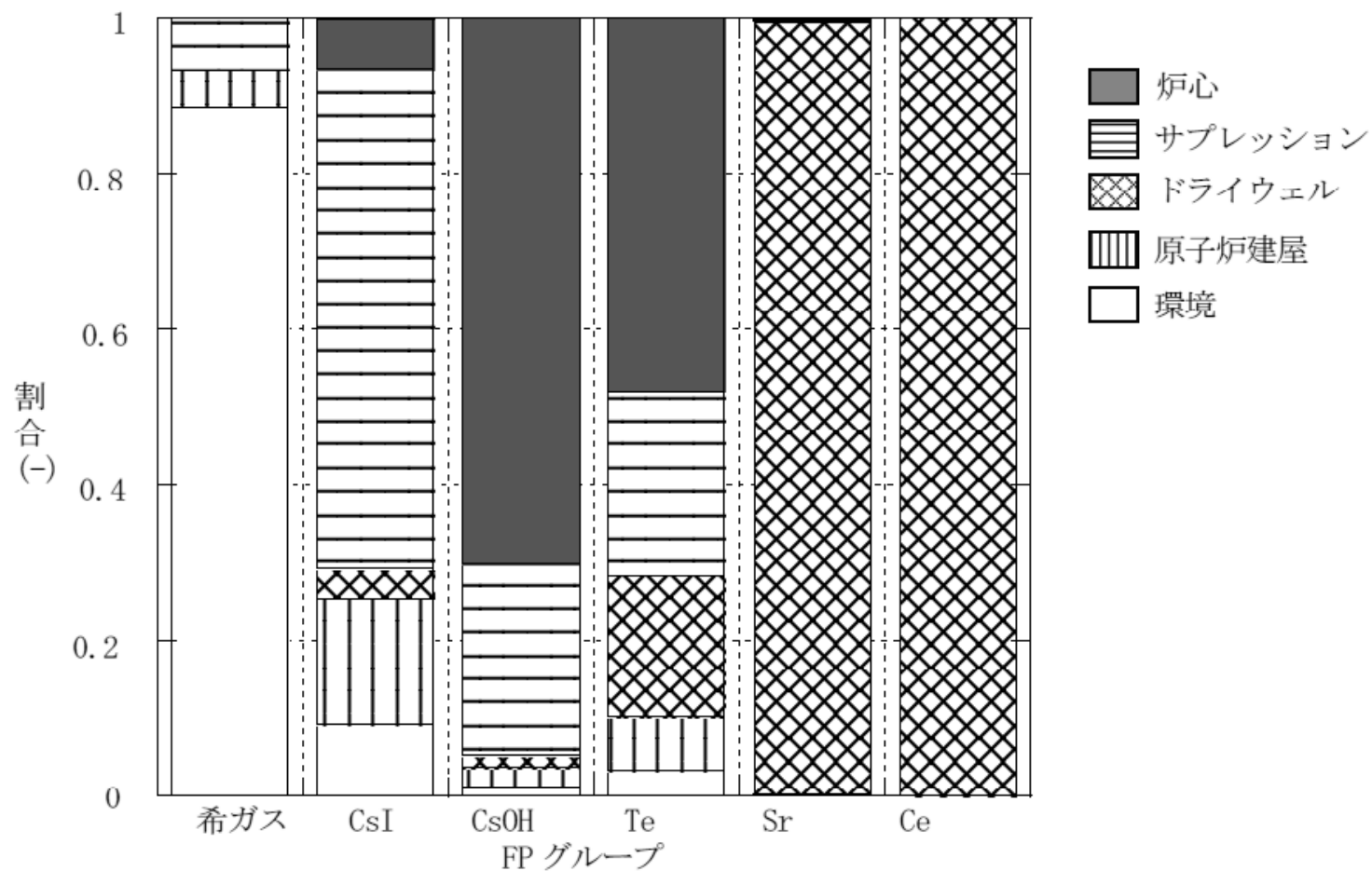




# 環境放出量割合



# 放射性物質分布



# シミュレーションでわかっていたこと

- 電源喪失事故の進展は速い。  
1 時間後炉心露出、3 時間後圧力容器破壊、7 時間後格納容器破壊、20 時間後建屋基礎貫通
- 格納容器破壊後環境への放出始まる。放出はシミュレーション時間範囲 (50 時間) でたらだら続く。
- 環境にでるのは主に稀ガス、ヨウ素、セシウム、テルル。ヨウ素で10% 程度、セシウムはその数分の一。

# 「現時点」での「事実」と思われるもの

- 1号機についてはほぼシミュレーション通りで手も足も出ないままに格納容器破壊にいたった。(東電 5/15 発表資料)
- 2、3号機は1-2日遅れだけど基本的には同じ。

東電が発表したのは5月だけど、シミュレーション結果、事故に関する報道、発表資料、環境放射線レベルから推定した放出量からは3/15くらいにはほぼシミュレーション通りにもものが動いていたことはわかっていた(牧野はそういう趣旨の文章を3/19に公開した)

# 放出された放射性物質の量

- 3/13 INES レベル4(数百テラベクレル以下)
- 3/18 INES レベル5(数百—数千テラベクレル)
- 4/12 INES レベル7(数万テラベクレル以上)
- 6月現在:「(ヨウ素換算)77万テラベクレル」(主にセシウムで2万テラベクレル)、チェルノブイリの約1/7

保安院の計算にはいっている放出のほとんどは3/15-16と3/20-21に起きているので、実際には3/15-16の時点でレベル7だったということ。

これは実は簡単な計算で当時容易に見積もることができた。

# 牧野の 3/18 の見積り

放出量と汚染度分布がわかっているウィンズケール事故と比較した。

- ウィンズケール事故では、原子炉から 50km のところの汚染は典型的には  $10^4 \text{Bq/m}^2$ 、総放出量は 1000 テラベクレル。
- 3/19 における福島県での原発から 50km のところでの典型的な測定値は  $2\text{-}3 \mu\text{Sv/h}$
- ヨウ素に対する換算係数を使うと  $1 \mu\text{Sv/h} = 4 \times 10^5 \text{Bq/m}^2$  (正しい数字は 7。4 は牧野の概算)
- なので、福島汚染は  $10^6 \text{Bq/m}^2$  となり、ウィンズケールの 100 倍
- 従って大体 1000 テラベクレルのウィンズケール事故の 100 倍、10 万テラベクレル

# ウィンズケール事故とは？

- 1957年10月にイギリス、ウィンズケールのプルトニウム生産専用原子炉で起こった。
- 原子炉は黒鉛減速炭酸ガス冷却炉。日本だと東海1号炉（既に停止・廃炉）
- 停止・点検中に黒鉛から発熱、火災に。消火まで16時間
- 約1,000 テラベクレルのヨウ素が放出された

日本への輸出が決まった直後。イギリスが「事故の時の補償はしない」と通告してきたきっかけになった？ → 原子力損害賠償法

# 安全委員会の 4/12 日発表

- 3/16 までの放出はヨウ素で大体 8 万テラベクレル
- セシウムはその 1/10

ということで、牧野の概算は 2 倍は違ってない。

但し、これは総放出量とは全く違う、ということに注意。爆発のあった 3/12-14 にはより大量の放出があったはずだが、これはその 3 日間の強い西風のため全て太平洋にいったと思われる。3/15 は事故後初めて北東からの風になった。



# ここまでのまとめ

- 福島原発で起きたタイプの事故 (電源喪失) については詳細なシミュレーションが昔から行われていた
- 結果は、基本的に数時間後 (非常用電源が何かあればそれがなくなって数時間後) にメルトダウン、稀ガス、ヨウ素、セシウムが大量放出される、というもの
- 5月以降の東京電力発表では、ほぼシミュレーション通りになっていたとしている
- 放射性物質の放出については、シミュレーション通りなら 3/12-14 に莫大な量の放出があったはず (実際、米空母ロナルドレーガンは 3/14 に 100 マイル離れたところで放射性物質の雲に遭遇している)
- 地上に落ちた量については 3/15 時点で 10 万テラベクレル程度

# シミュレーションがこんなに上手くいくのは何故？

例えば地震予知とか天気予報は難しいのに、原発事故ってそんなに簡単に計算できるのか？

これは実はできる。電源喪失から炉心溶融までは、圧力容器の圧力は(弁の作用で)一定に保たれる。また、放射性物質の崩壊熱の大きさは正確にわかっている。このため、どれだけの率で水が蒸発していき、何時間後に炉心損傷するかはかなり正確にわかる。

圧力容器は燃料棒落下後そんなにもたない。格納容器は破壊にいたる圧力は正確にはわからないが、時間はそんなにずれない。

# 津波については？

これもシミュレーションあり。「地震に係る確率論的安全評価手法の改良  
= BWRの事故シーケンスの試解析」

仮定:

- 海水ポンプは波高7m以上、復水貯蔵タンク/起動変圧器等の屋外設置機器は15mで機能喪失
- 建屋への海水侵入は13m、15mで機能喪失

結論:

- 7m以上で炉心損傷確率が「1」。つまり、他が無傷でも海水ポンプ機能喪失だけで自動的に炉心損傷となる。

## 要するに

7m の津波でメルトダウンすると以前からわかっていた

「想定外」の 14m の津波が事故の原因、というのは嘘、とはいわないが、予測の範囲の津波でもどうせ事故になっていたはず

# 要するに

7mの津波でメルトダウンすると以前からわかっていた

「想定外」の14mの津波が事故の原因、というのは嘘、とはいわないが、予測の範囲の津波でもどうせ事故になっていたはず

え、でも、想定外だったから大事故になったんじゃ？

# 国会での議論

2006/12/13 巨大地震の発生に伴う安全機能の喪失など原発の危険から国民の安全を守ることにに関する質問主意書

この要点は地震、津波の時に

- ディーゼルは動かないのではないのか？
- 燃料棒バーンアウトは起きないのか？

というもの。

答弁

- 我が国において、非常用ディーゼル発電機のトラブルにより原子炉が停止した事例はなく、また、必要な電源が確保できずに冷却機能が失われた事例はない。
- 経済産業省としては、お尋ねの評価は行っておらず、原子炉の冷却ができない事態が生じないように安全の確保に万全を期しているところである。

# 国の答弁の意味

この答弁を素直に読むと

起こったことがない事故のことなんか知らん  
今まで事故起きてないんだから大丈夫だ

と書いてある。予想されていてもまだ起こってない事故には対策しない、  
といってる

つまり：「想定外」＝まだ起こってなかったので対策しませんでした

どうしてそんな馬鹿なことになったか？

# 人間の特性 7 箇条（高橋秀俊）

- 人間は気まぐれである
- 人間は怠け者である
- 人間は不注意である
- 人間は根気が無い
- 人間は単調を嫌う
- 人間は理論的思考力に弱い
- 人間は何をするかわからない

**事故が起きてないと段々さぼる。**

というだけかも。



# 「科学者からの情報発信」

- 特に事故直後の1週間程度、原発事故の影響がどれほどのものか、は国・東京電力の公式発表やメディア報道からはよくわからなかった(例の「ただちに健康に影響はない」しか情報がなかった)
- ここまででみたように、国・東京電力の3月頃の発表と、現在わかっている当時の原子炉の実際の状況、放射性物質の放出状況には大きなずれがあった。

このギャップを埋めるのは「客観的で中立」な情報を提供する科学者の役割、とかいう議論もできないわけではない。実際はどうだったか？

# 天文学会 ML に 3/19 に流れたメールから

「福島原発の放射能を理解する」スライド公開

<http://ribf.riken.jp/~koji/jishin/>

素粒子実験分野の研究者 / 院生の皆さん

今回の震災に起因した福島原発の事故について国民の不安が高まっています。チェルノブイリのようになってしまおうと思っている人も多いです。放射線を学び、利用し、国のお金で物理を研究させてもらっている我々が、持っている知識を周りの人々に伝えるべき時です。

アメリカの Ben Monreal 教授が非常に良い解説を作ってくれました。

# 続き

<http://online.kitp.ucsb.edu/online/plecture/bmonreal11/>

もちろん個人的な見解ですが、我々ツイッター物理  
クラスタの有志はこれに賛同し、このスライドの  
日本語訳を作りました。能力不足から至らない点もあると  
思いますが、皆さん、これを利用して自分の周り（家族、  
近所、学校など）で国民の不安を少しでも取り除くための  
「街角紙芝居」に出て頂けませんでしょうか。

よろしくお願いします。

(人名省略)

翻訳の許可をオリジナル作成者よりいただいています。

# 物理学者の活動の方向

先に紹介したメッセージは典型的

- 「チェルノブイリのようになってしまうと思っている人も多いです」  
(放射性物質放出量は実際になっていた)
- 「国民の不安を少しでも取り除く」(取り除くのは自明に正しいのか?)

つまり:ネット上でみられた科学者の活動の多くは、事故の規模を過小評価した上で「安全」を強調するものになってしまっていた。

何故か? はともかく前例はチェルノブイリでもあった  
(ソ連だけでなくイギリス・フランスでも)。

# 理由の憶測

- 単に皆さん単純に安全であると思い込みたかった。(正常性バイアス)
- 研究者の側だけの問題ではなく、情報を受容する側が危険を過小評価する情報を積極的に受容・拡散した
- 原子核・素粒子の研究者は(意識的かどうかはともかく)危険を過小評価する傾向を持つ
- その他

# 科学史・科学論・STSの研究者は何をするべきだったか？

- 何が正しいかまだわからなかった状況では大したことはできなかった、という考え方もある
- しかし、「このような事故の時には国・専門家からの情報発信はどのような傾向があるか」という知見は十分蓄積されていたはず。何故それが生かされなかったのか？

おしまい