福島原発事故で起こったこと
—シュミレーションから考える

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

東工大「火曜日ゼミ」2011/6/28

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

  これはなんでしょう？

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

計算機開発

20 年くらいだらだらやっている。

- 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-2(1990)

GRAPE-3(1991)

GRAPE-4(1995)

GRAPE-6 system

2002年の 64 Tflops システム

4 ブロック
16 ホスト
64 プロセッサボード

GRAPE-DR クラスタシステム(2008)

Little Green500 (2010/6)

Listed below are the Little Green500's Top 10 most energy-efficient supercomputers in the world as of June 2010.

Green500 Rank	MFLOPS/W	Site*	Computer*	Total Power (kW)
1	815.43	National Astronomical Observatory of Japan	GRAPE-DR accelerator Cluster, Infiniband	28.67
2	773.38	Forschungszentrum Juelich (FZJ)	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
2	773.38	Universitaet Regensburg	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
2	773.38	Universitaet Wuppertal	QPACE SFB TR Cluster, PowerXCell 8i, 3.2 GHz, 3D-Torus	57.54
5	536.24	Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Modelling, University of Warsaw	BladeCenter QS22 Cluster, PowerXCell 8i 4.0 Ghz, Infiniband	34.63
6	530.33	Repsol YPF	BladeCenter QS22 Cluster, PowerXCell 8i 3.2 Ghz, Infiniband	26.38

- 消費電力当りの性能でランキング
- ちょっと小さいめのシステムまであり、のリストで１位
- 何故かNHK まで取材にきた。

と、前置きはこれくらいにして

何がいいたかったか:

と、前置きはこれくらいにして

何がいいたかったか:

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
- 「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・８ｍ （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…冷却水枯渇止めろ！ （3月17日 06:52）
- 陸自ヘリ、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、自衛隊ヘリ確認 （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でたんだろう？(すごい量の放射性物質がでてんじゃないか？)

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２ＰＳＡ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 独立行政法人 原子力安全基盤機構
Japan Nuclear Energy Safety Organization

文字サイズ変更 小 中 大

Google™カスタム検索 ▸ 検索
▸ 拡張検索(カテゴリ毎の検索)

ホーム 利用ガイド お問い合わせ サイトマップ ENGLISH

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】	報告書	ダウンロード
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込みと実機ベンチマーク問題解析＝	10原熱報-0001	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	目次 全文 (3.39MB)
地震時レベル2PSAの解析(BWR)	10原シ報-0003	目次 全文 (5.13MB)
地震時のレベル3PSAの検討 ＝不確実さ解析手法の検討＝	10原シ報-0004	目次 全文 (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	目次 全文 (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	目次 全文 (5.36MB) 付録 (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 の外で漏え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、余熱除系配管破談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)

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

3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
炉心最高温度 (K)
時間（分）
炉心露出
炉心支持板破損
(リング1)
炉心支持板破損
(リング2)

格納容器圧力

1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
格納容器系圧力（MPa）
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
時間（分）
RPV破損
PCV破損
ペデスタル貫通
ドライウェル
ウェットウェル
ベント管
原子炉キャビティ
原子炉建屋1F
燃料交換建屋

サプレッションプール温度

環境放出量割合

環境放出量割合
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
10^{-14}
10^{-16}
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
時間（分）
Xeグループ
Csグループ
Baグループ
Teグループ
Ruグループ
Moグループ
Ceグループ
Laグループ
Uグループ
Cdグループ
Snグループ
CsIグループ

放射性物質分布

1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
割合
(-)
希ガス
CsI
CsOH
Te
Sr
Ce
FP グループ
炉心
サプレッション
ドライウェル
原子炉建屋
環境

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) でだらだら続く。
- 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 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 $10^4\mathrm{Bq/m^2}$、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 2-3μSv/h
- ヨウ素に対する換算係数を使うと $1\mu\mathrm{Sv/h} = 4 \times 10^5\mathrm{Bq/m^2}$(正しい数字は 7。4 は牧野の概算)
- なので、福島の汚染は $10^6\mathrm{Bq/m^2}$ 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

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 倍は違っていない。

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。

「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に流れたメイルから

「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」(実際なっていた)
- 「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？は多分今後科学論・科学社会学の良い題材になるのでは？

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？

- 発言自体が殆ど見えないような気がする。平川さんくらい？
- この事態をあとから分析すればいい、ってもの？過去の事例からいえることは？

おしまい