

# シビアアクシデント評価の基礎技術

総合企画部 湊 明彦

原子力安全解析セミナー  
2014年11月27日（木）  
アドバンスソフト株式会社

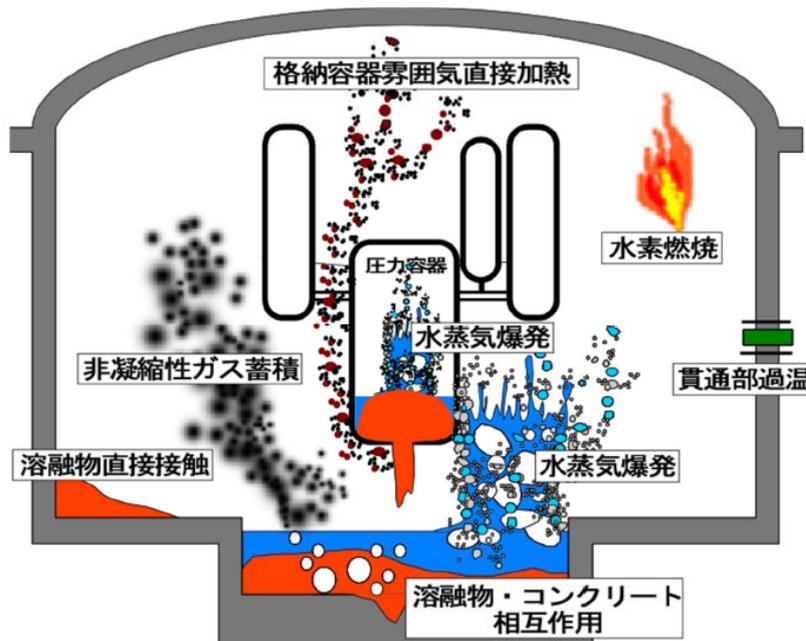
シビアアクシデント評価の精度/信頼性の向上に向けて

マクロ現象のシーケンス解析 + 主要熱流動現象のCFD解析

## 報告内容

- ・シビアアクシデントの主要な熱流動現象
- ・SAMPSONコードのモジュール
- ・CFD解析例
  - (1)水素爆轟
  - (2)デブリ落下
  - (3)デブリスプレッド
  - (4)デブリ堆積層冷却
  - (5)水蒸気爆発
- ・結言

## SAに係る研究について



- ・ 水蒸気爆発
- ・ 格納容器雰囲気直接加熱
- ・ 溶融物・コンクリート相互作用
- ・ 水素燃焼
- ・ 非凝縮性ガス蓄積による格納容器加圧
- ・ 格納容器貫通部加温

梶本光廣, 「連載講座軽水炉の確率論的安全評価 (PSA) 入門 第5回内の事象レベル2 PSA」, 日本原子力学会誌, Vol. 48, No. 8, 571 (2006).

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

3

## シビアアクシデント研究の成果

- シビアアクシデント研究及び確率論的安全評価の研究が進み、シビアアクシデントを支配する現象及びシビアアクシデントに至る事故シーケンスが明らかになってきた。
- これらの研究の進捗によって、
  - a) シビアアクシデントに至る事故シーケンスは、比較的少数に類別化ができること、
  - b) シビアアクシデント現象の発生及び緩和に関する拘束条件が明らかにされてきたこと、
 等から、シビアアクシデントに対する具体的な対応策が立案できるようになってきた。

原子力安全委員会、第6回「当面の施策の基本方針の推進に向けた外部の専門家との意見交換-安全確保の基本原則に関すること-」、原子力安全委員会第1・2会議室、虎ノ門三井ビル2F、2011年12月13日  
梶本光廣氏資料より

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

4

# シーケンスコード SAMPSONの解析モジュール

(図はセミナーのみ表示)

引用) <http://www.iae.or.jp/group/07.html>

事象の進展 

フェーズI	フェーズII	フェーズIII
起因事象 スクラム 燃料溶融 リロケーション 圧力容器破損	デブリ落下・堆積 水蒸気爆発 コンクリート浸食 デブリ層過熱 格納容器破損	水素爆発(爆轟) 建屋破損

■ 燃料溶融/流下  
(キャンドリング)

■ デブリ落下・堆積

■ 水素爆発(爆轟)

■ 水蒸気爆発

■ コア-コンクリート反応

■ デブリスプレッド

■ デブリ堆積層冷却

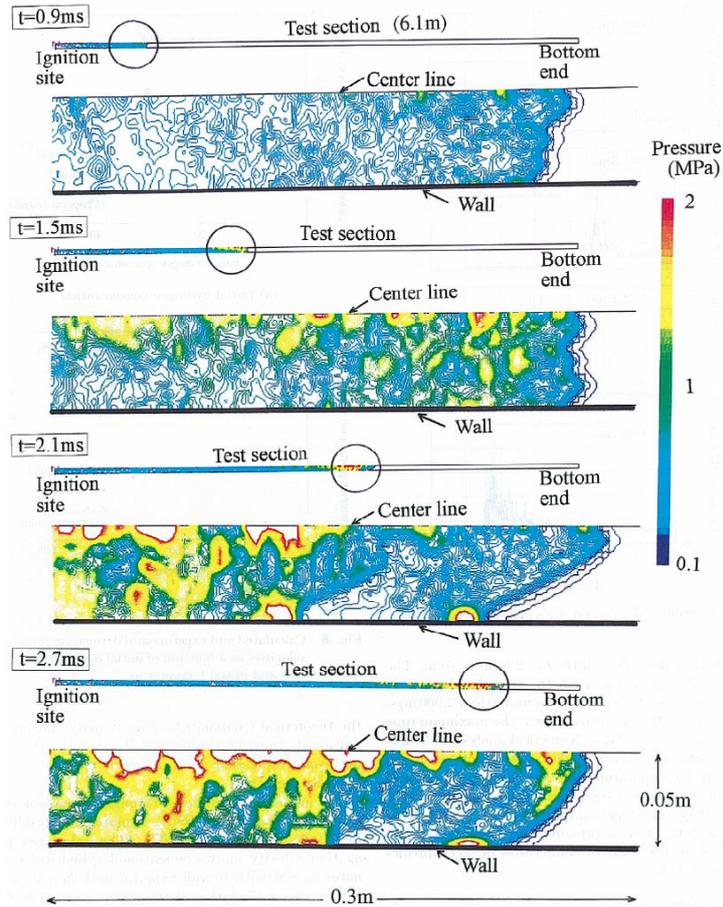
CFD評価の  
課題

 解析例を紹介

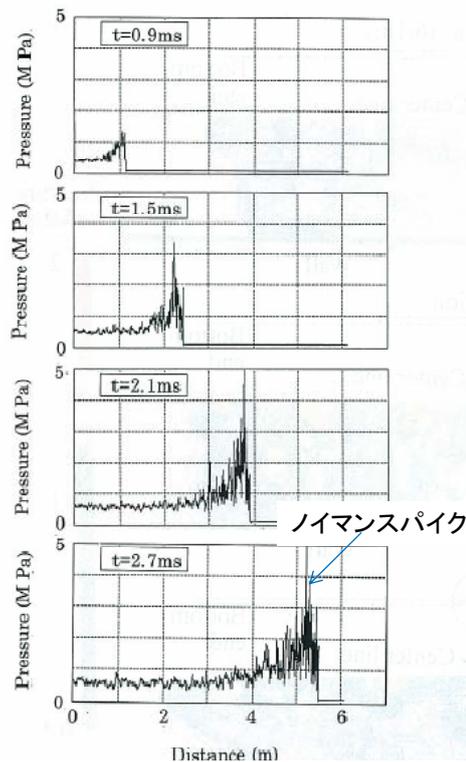
# 水素爆轟解析 (波面近傍の圧力分布)

- ・圧縮性気体3次元解析
- ・爆轟波面の保存量束の連続性  
(ランキン-ユゴニオ関係式)
- ・燃焼熱による爆轟波面エネルギーギャップの遷移  
(チャプマン-ジュゲ関係式)

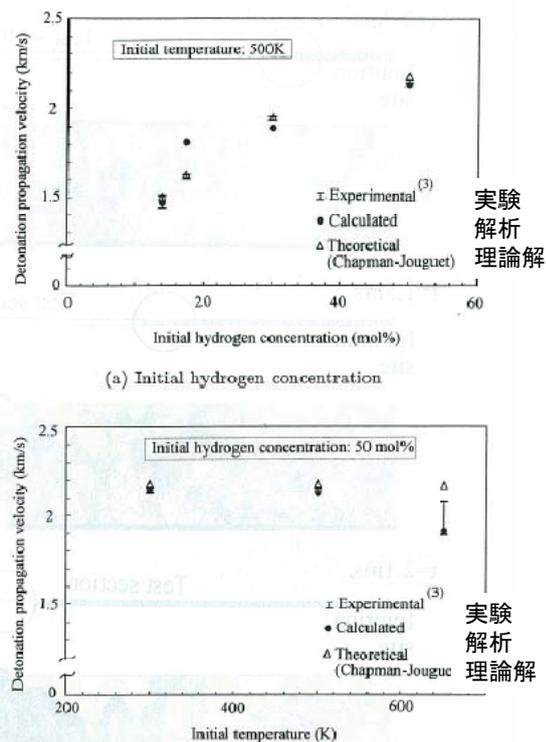
引用: Minato, A., Tanaka, N.  
JNST, 35[4], p.278, (1998)



## 爆轟波伝播解析結果



## 伝播速度解析のBNL実験との比較



引用: Minato, A., Tanaka, N.  
JNST, 35[4], p.278, (1998)

# 実機条件の水素爆燃解析

(図はセミナーのみ表示)

## ブラスト波の伝播解析

引用: Breitung, W., Analysis Methodology for Hydrogen Behaviour in Accident Scenarios, Proc. Int. Conf. on Hydrogen Safety (2006)

# 水蒸気爆発モデル(JASMINEコード)



(図はセミナーのみ表示)

メルトジェット貫入

メルト液滴分離

微細化,爆発

引用: Moriyama, K., Takagi, S., Muramatsu, K., Nakamura, H., Maruyama, Y., Evaluation of Containment Failure Probability by Ex-Vessel Steam Explosion in Japanese LWR Plants, JNST, 43[7], p.774 (1006)

# 水蒸気爆発の熱流動シミュレーション

(図はセミナーのみ表示)

引用: Moriyama, K., Takagi, S., Muramatsu, K., Nakamura, H.,  
Maruyama, Y., Evaluation of Containment Failure  
Probability by Ex-Vessel Steam Explosion in  
Japanese LWR Plants, JNST, 43[7], p.774 (1006)

# 水蒸気爆発解析と実験(KROTOS)の圧力履歴比較

(図はセミナーのみ表示)

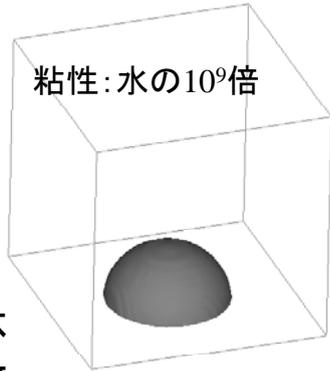
KROTOS26

KROTOS28

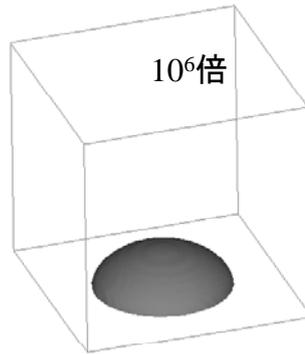
引用: Yang, Y., Moriyama, K., Maruyama, Y., Park, H.S., Sugimoto, J.  
Propagation Calculation for Steam Explosion with  
JASMINE-Pro Code, ICONE-7235 (1999)

# 高粘性流体の解析

高粘性流体  
運動量拡散  
速度による  
不安定緩和

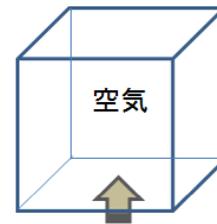


粘性係数 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$

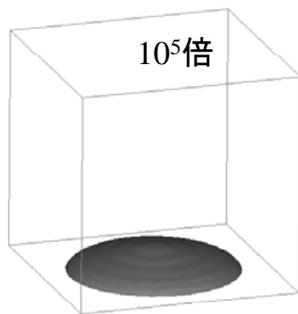


粘性係数 $10^3 \text{Pa}\cdot\text{s}$

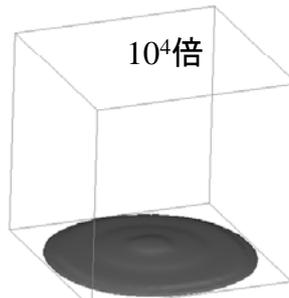
解析領域 0.5m立方  
密度  $1000 \text{kg/m}^3$



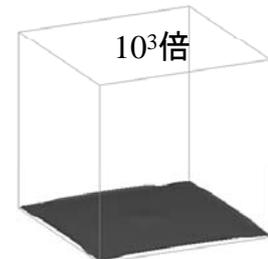
粘性流体湧出し(0.1m/s)  
(7.2cm平方開口から6秒間)



粘性係数 $10^2 \text{Pa}\cdot\text{s}$



粘性係数 $10^1 \text{Pa}\cdot\text{s}$



粘性係数 $1 \text{Pa}\cdot\text{s}$

# 非ニュートン流体の自由液面流解析

(図はセミナーのみ表示)

非構造格子のガラキン法離散化, 界面追跡のラグランジェ計算

- ・粘弾性/ビンガム流体
- ・溶融/固化と潜熱

引用:

Vola,D.,Babik,F.J-C.Latche  
On a Numerical Strategy to Compute Gravity Current  
Of Non-Newtonian Fluids, J. Comp. Phy., 201,p.397 (2004)

# デブリ粒子落下・堆積解析のモデル

(図はセミナーのみ表示)

沸騰流れの中に  
粒子群を投入し  
軌跡を計算

着床粒子の  
堆積計算

堆積層を更新し  
沸騰流れを計算

引用: Yakush, S.E., Kudinov, P., Din, T-N., Multiscale Simulations of Self-Organization Phenomena in the Formation and Coolability of Corium Debris Bed, NURETH-13, N13P1143 (2009)

# 沸騰プールへの デブリ粒子 落下・堆積解析

(図はセミナーのみ表示)

引用: Yakush, S.E., Kudinov, P., Din, T-N., Multiscale Simulations of Self-Organization Phenomena in the Formation and Coolability of Corium Debris Bed, NURETH-13, N13P1143 (2009)

# 狭隘ギャップの限界熱流束解析

Table 1 Steam and Water Properties

Density	Steam	0.598 kg/m <sup>3</sup>
	Water	958.12 kg/m <sup>3</sup>
Kinematic viscosity	Steam	20.54 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
	Water	0.2945 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
Eddy viscosity coefficient		10.0
Surface tension		58.92 × 10 <sup>-3</sup> N/m
Latent heat		2256.9 kJ/kg

(Saturated steam and water at 0.1MPa)

加熱域  
ギャップ幅2mm

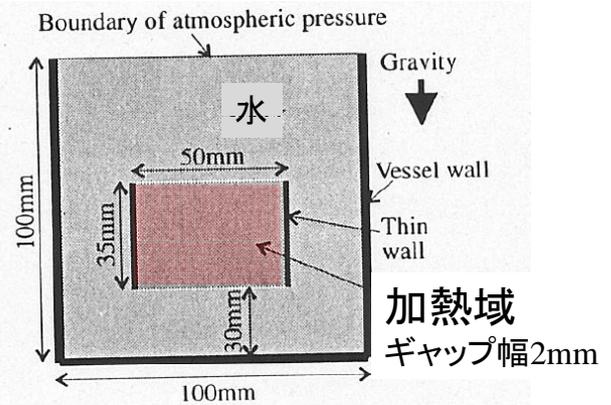
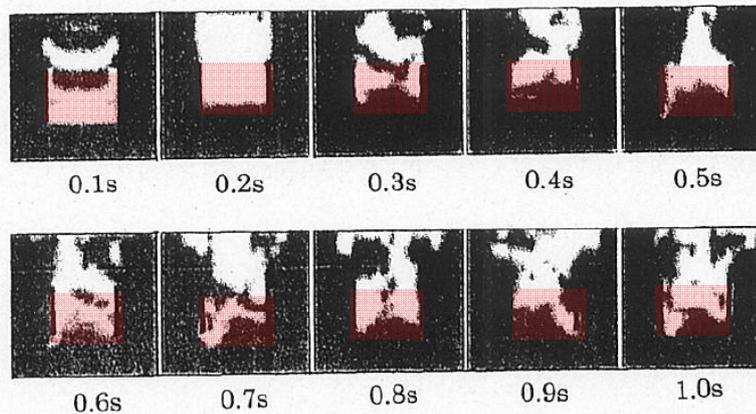


Fig. 1 Calculation Conditions of Boiling in a Gap for Simulation of Tests by Monde, et al.

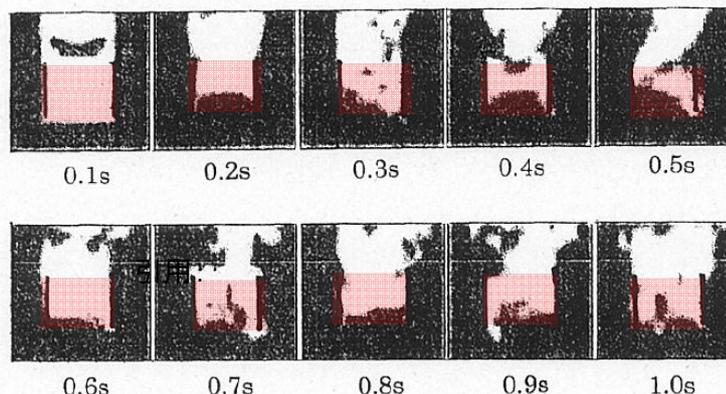
引用: Minato, A., Takamori, K., Ishida, N. NTHAS98 (1998)

50% CHF



Monde実験  
のCHF条件

100% CHF



引用:

Minato, A., Takamori, K., Ishida, N., NTHAS98 (1998)

# 発熱堆積層冷却の解析

(図はセミナーのみ表示)

- ・多孔質内の二相流,CCFL  
(ダルシー則,毛管圧)
- ・チャネリング,ギャップ形態
- ・多孔質とプールの同時計算

引用

Buerger,M.,Buck,M.,Schmidt,W.,Widmann,W.,  
Validation and Application of the Wabe code,  
Investigations of Constitutive Laws and 2D Effect  
On Debris Coolability, NED, 236, p.2164 (2006)

19

(図はセミナーのみ表示)

Buerger,M.,Buck,M.,Schmidt,W.,Widmann,W.,  
Validation and Application of the Wabe code,  
Investigations of Constitutive Laws and 2D Effect  
On Debris Coolability, NED, 236, p.2164 (2006)

20

# 結言

主要熱流動現象のCFD解析例を紹介した。

- (1)水素爆轟
- (2)デブリ落下
- (3)デブリスプレッド
- (4)デブリ堆積層冷却
- (5)水蒸気爆発

## 課題

- ・実験に依存しない機構論的モデルの開発
- ・実験, 福島第一の知見との比較による検証
- ・大規模/高速計算による実機解析
- ・マクロ現象シーケンスコード(SAMPSON, MELCORなど)  
と統合した総体的な評価精度向上