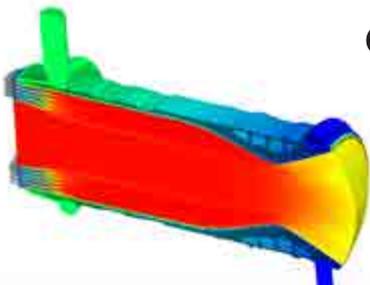


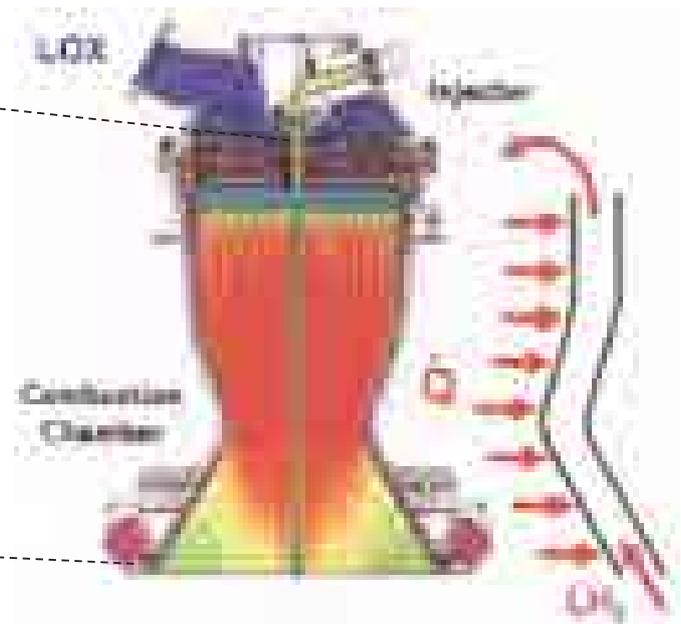
# 液体ロケットフルスケール燃焼器 再生冷却性能予測手法の提案

宇宙航空研究開発機構  
情報・計算工学センター

○大門 優、根岸 秀世、山西 伸宏



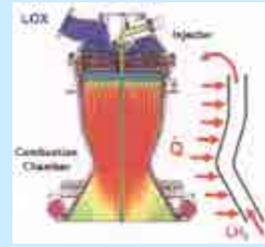
## 背景 ロケットエンジン燃焼器



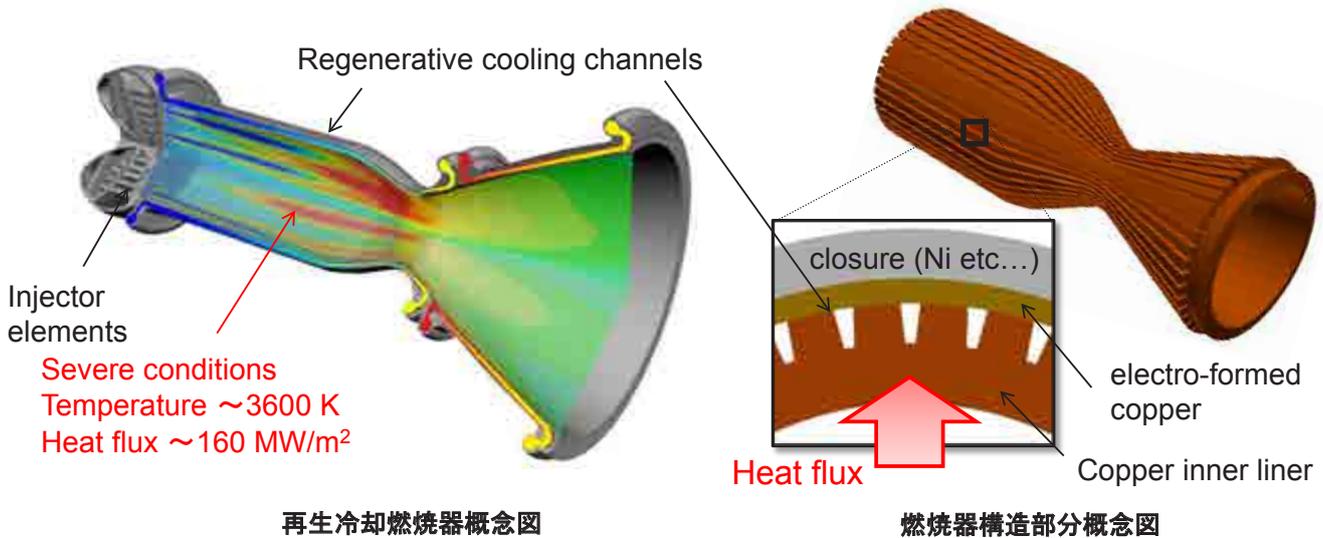
## 背景 再生冷却技術

### 再生冷却の役割

- 小さな圧力損失を保ちながら壁面を冷却する
- ターボポンプを回すためのエネルギーを得る  
(エキスパンダーブリードサイクル)



Prog. in Astronautics and Aeronautics,  
Vol. 200, AIAA, 2004.



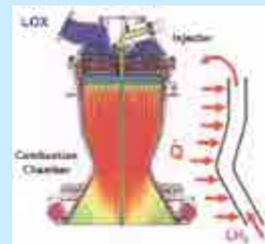
再生冷却燃焼器概念図

燃焼器構造部分概念図

## 背景 再生冷却性能予測に対してCFDの適用

### 再生冷却の役割

- 小さな圧力損失を保ちながら壁面を冷却する
- ターボポンプを回すためのエネルギーを得る  
(エキスパンダーブリードサイクル)

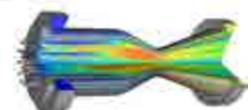


Prog. in Astronautics and Aeronautics,  
Vol. 200, AIAA, 2004.

### エンジン開発における再生冷却への要望:

- 壁面を効率的に冷却し、効率的にエネルギーを得る
- ✓ 燃焼器内部の物理現象を理解する必要がある:  
燃焼ガス、冷却材流れ、熱伝導特性
- ✓ 再生冷却性能を予測する:
  - 燃焼ガス側、冷却材側の壁面熱流束
  - 壁面温度
  - 冷却材流れの圧力損失と昇温量

CFDを利用して再生冷却性能予測をしたい



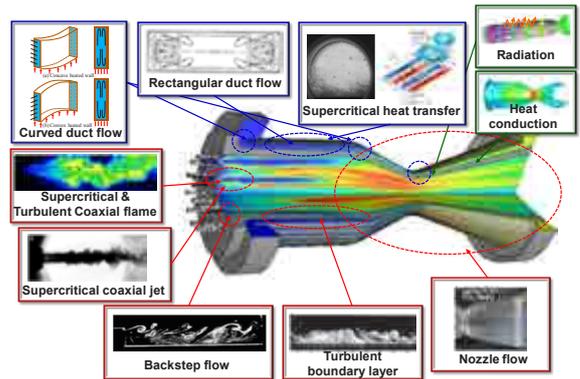
# 背景 フルスケール再生冷却性能予測解析の課題

## 【燃焼器側壁面熱流束予測の課題】

- 物理モデル
  - 各物理モデルの精度
  - 物理モデルの集合
  - 計算時間とのトレードオフ
- インジェクターの数
  - 計算負荷低減

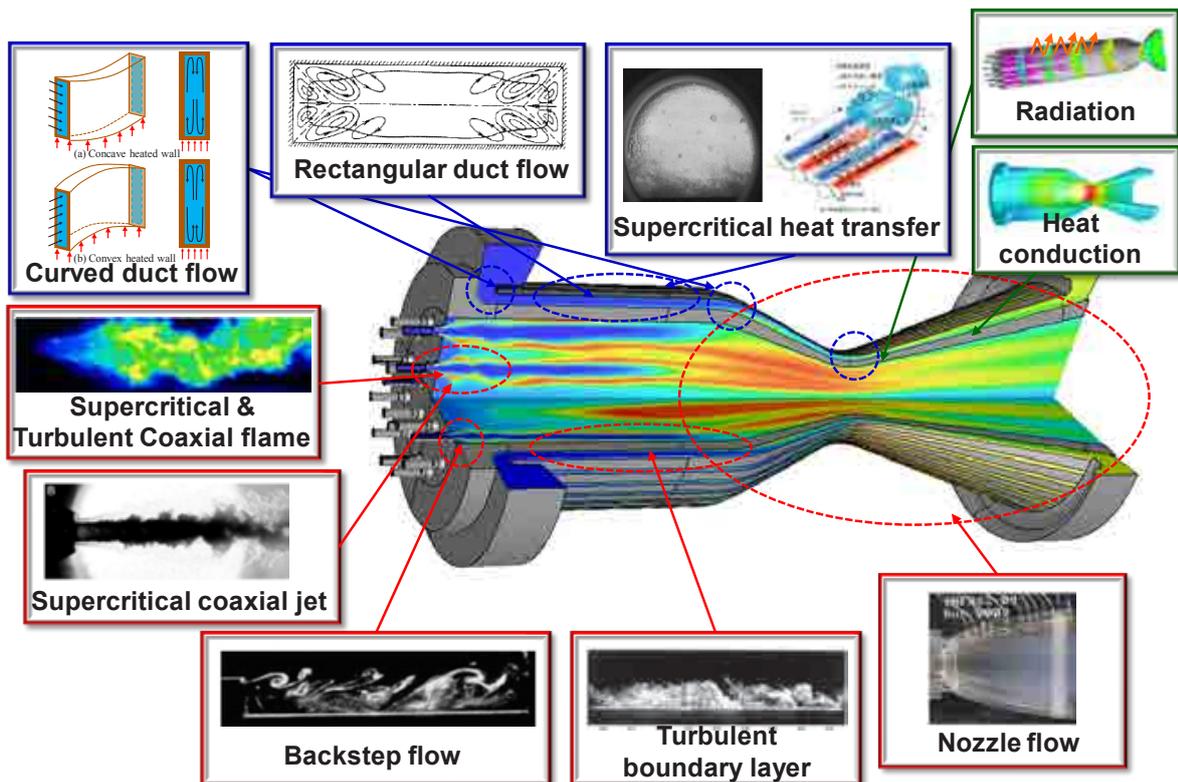


## 計算時間との戦い



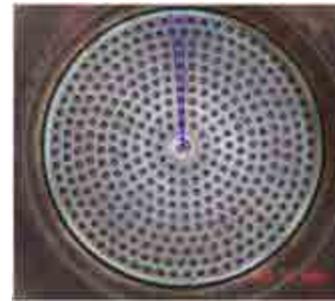
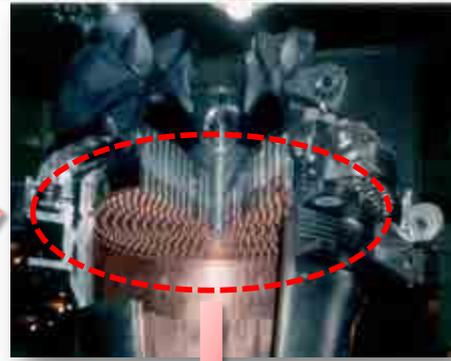
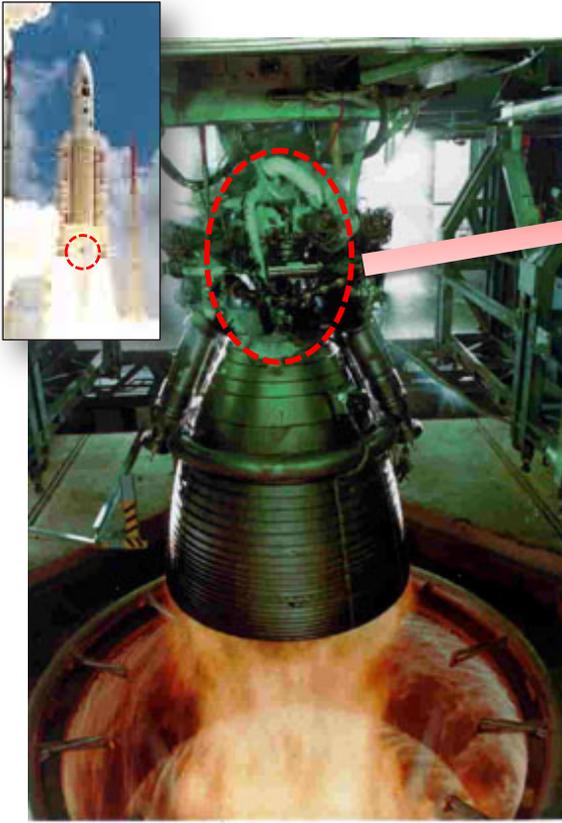
5

## 物理現象の集合 ⇒ 物理モデルの集合



6

## フルスケールを実現するための壁:インジェクタの数



フルスケール燃焼器は数百本のインジェクタを持つ  
 ⇒解析負荷が高い(全周12年、一部4.5ヵ月)  
 ⇒ **計算の効率化、簡略化手法が必須**

*Vulcain II; the booster stage engine of ARIAN V*

7

## 目標および本公演内容

### 【目標】

- フルスケール燃焼器の再生冷却性能を**数週間**で評価する手法を開発する。
  - 評価項目: **液面熱流束**、壁面温度、冷却材流れ圧力損失昇温量

### 【キー技術】

- 複数の物理モデルの精度評価
  - 計算負荷とのトレードオフ
- インジェクター簡略化手法

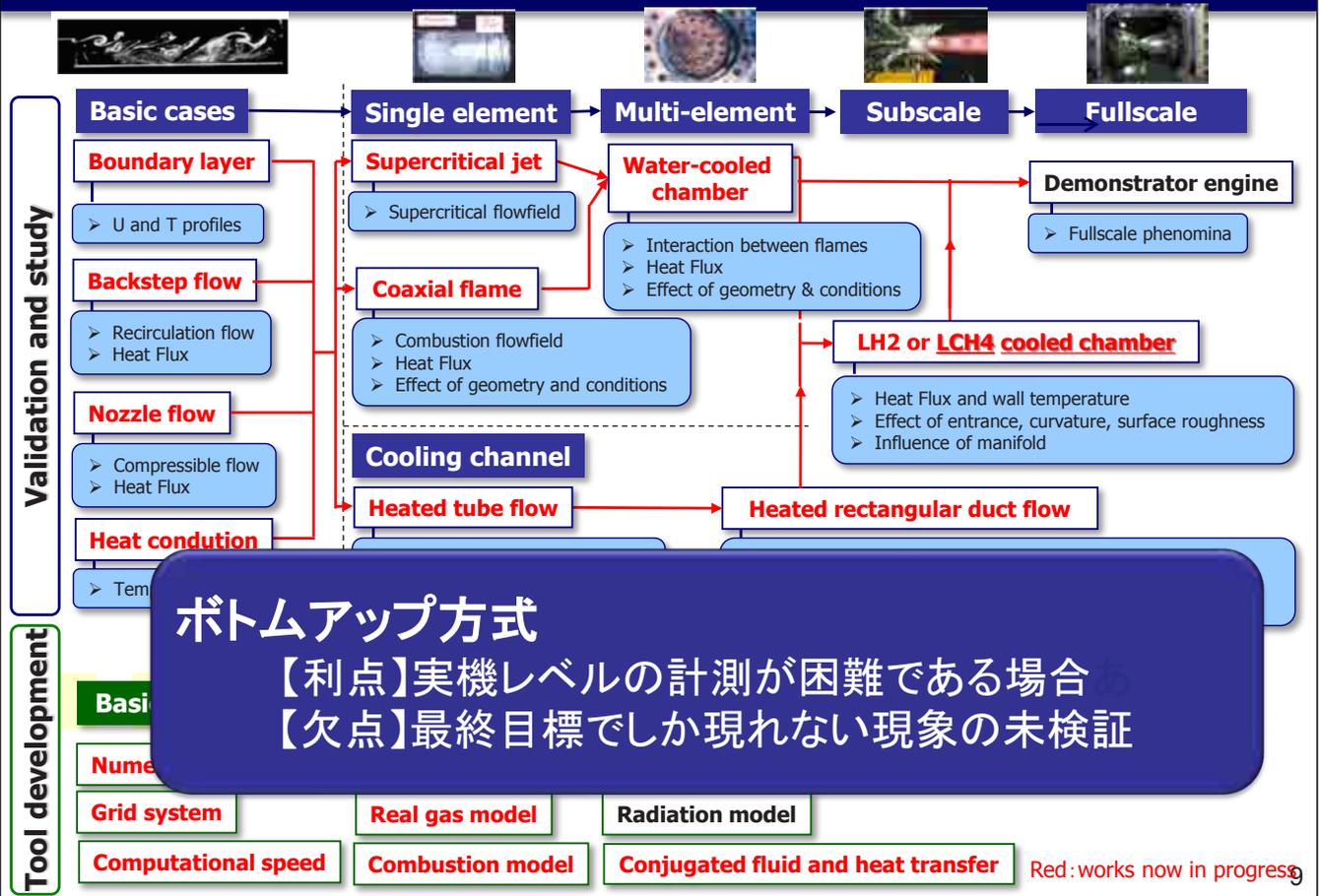
⇒ JAXA社会連携講座

### 【講演内容】

- 燃焼ガス側壁面熱流束検証方法
- 燃焼ガス側壁面熱流束検証結果
- 効率的なモデリングの検証およびフルスケール燃焼器への適用結果

8

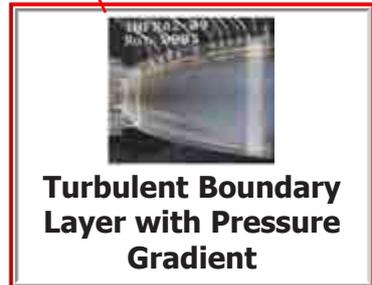
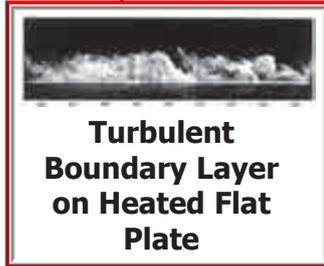
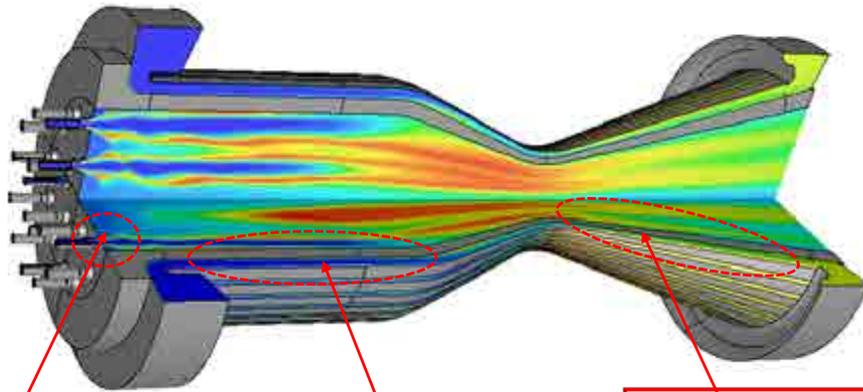
# 検証作業 (ボトムアップ方式)



# 解析手法

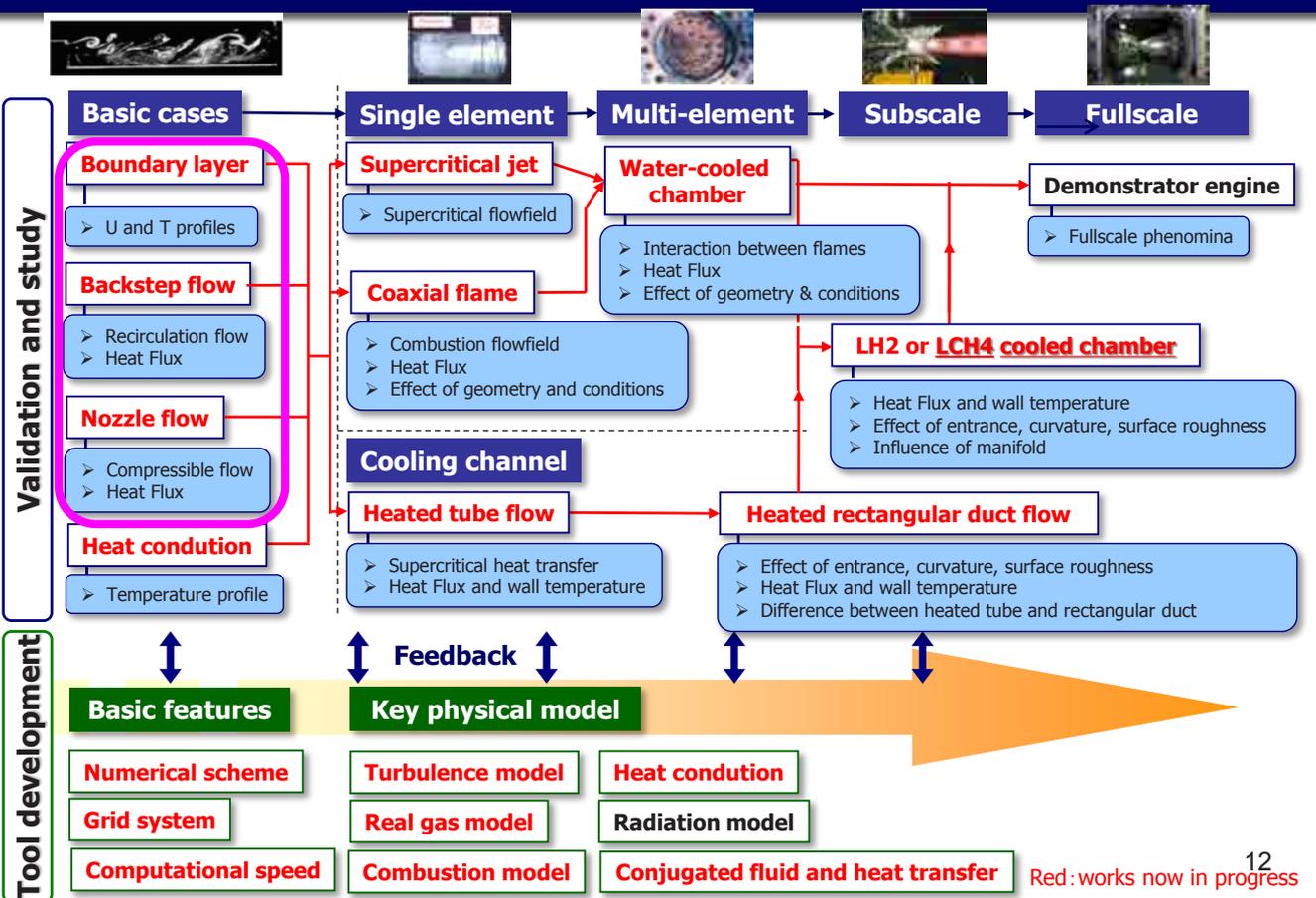
- **Solver:** CRUNCH CFD developed by CRAFT Tech.
  - **Governing eq.:** 3D compressible RANS
  - **Convective terms:** 2nd order upwind
  - **Viscous terms:** Central differencing
  - **Turbulence model:** Low-Re-type  $k-\epsilon$  model *Papp, JPP, 2011*
  - **Combustion model:** Laminar finite rate (8species and 21 reactions) *Shimizu and Koshi, JPP, 2011*
  - **Equation of state:** Soave-Redlich-Kwong EoS
  - **Transport properties:** Ely and Hanley model
- 連携講座発の反応モデル

# 壁面漸近挙動モデルの検証

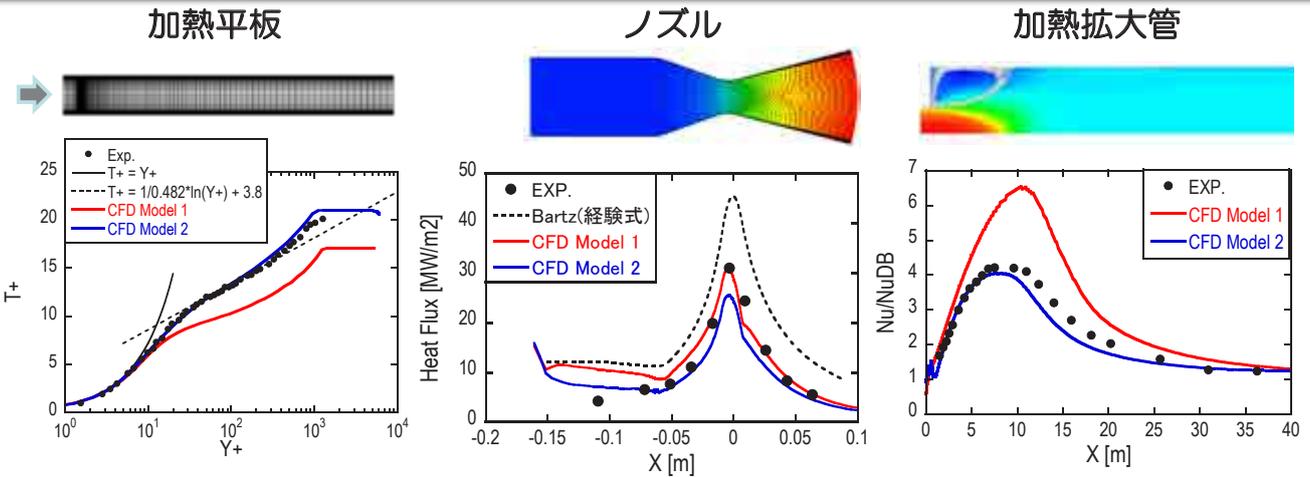


壁面熱流束に着目し壁面漸近挙動モデルの評価を実施

# 壁面漸近挙動モデルの検証



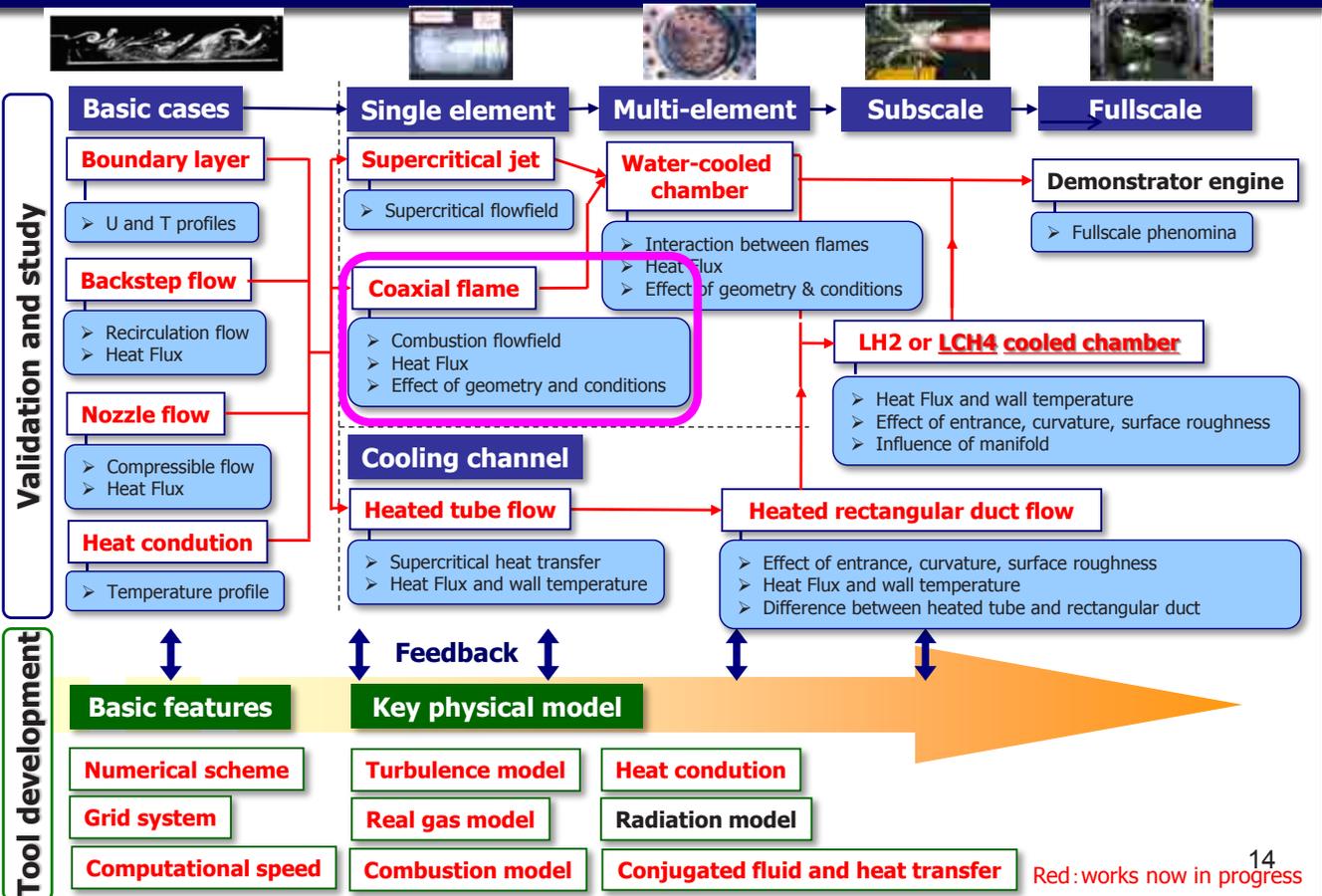
# 壁面漸近挙動モデルの検証



Near-Wall Model	加熱平板	ノズル	加熱拡大管
Model 1 (Low-Re)	Fair	Good	Bad
Model 2 (Two-layer)	Good	Fair	Good

- 流れ場の特徴によって、適切な壁面漸近挙動が異なる。

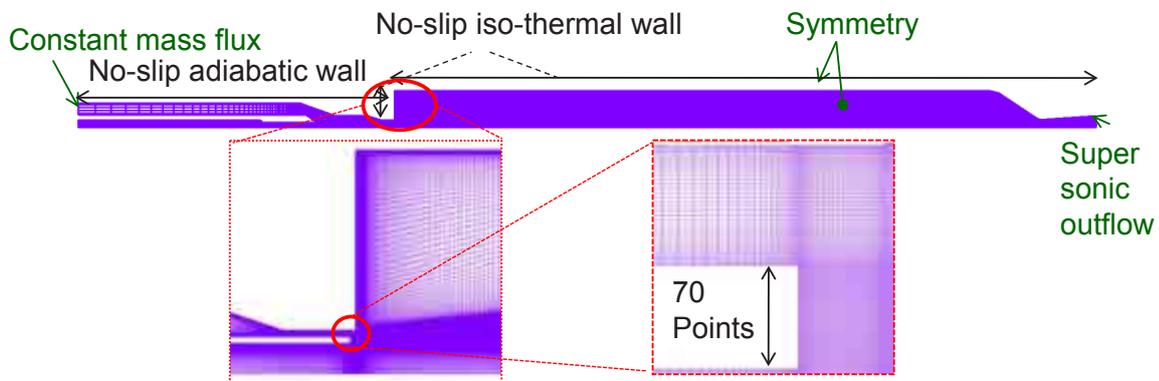
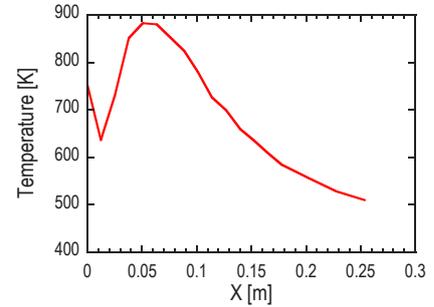
# 壁面漸近挙動モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験



# 壁面漸近挙動モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験

- 対象: GH2/GO2 シングルエレメント燃焼試験
- 条件;
  - 燃焼圧力 = 5.2MPa
  - 燃料温度 = 800 [K]
  - 酸化剤温度 = 711 [K]
  - 燃料流量 =  $3.31 \times 10^{-2}$  [kg/s]
  - 酸化剤流用 =  $9.04 \times 10^{-2}$  [kg/s]
  - 壁面温度 = 空間分布あり固定 (右図参照)
- 格子
  - 322000 点
  - 最少格子幅 =  $0.3 \mu\text{m}$  ( $Y^+ < 1$  in all zone)

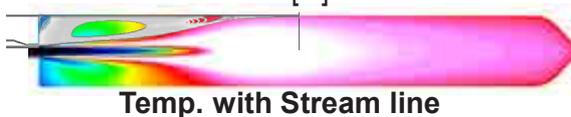
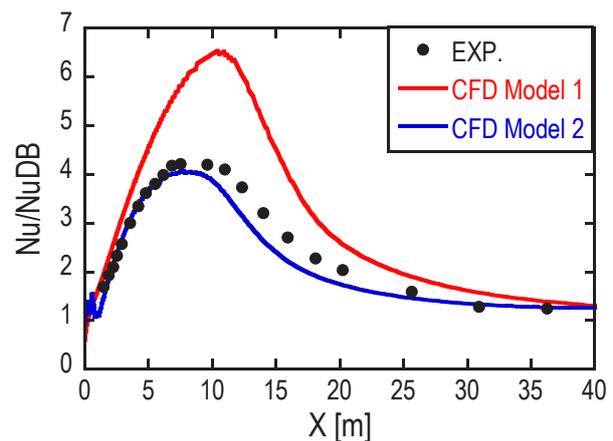
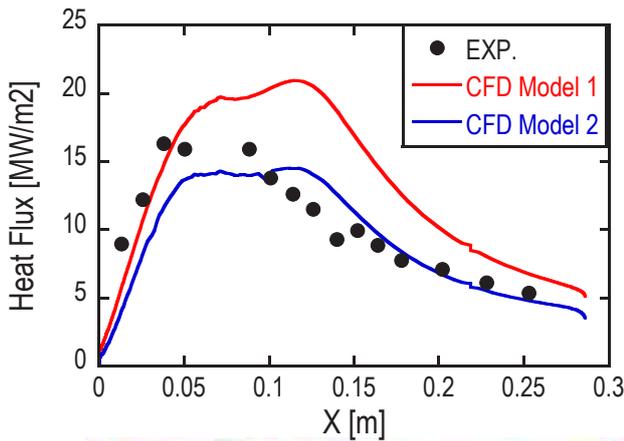
Marshall et al. (Penn. State Univ.),  
AIAA-2005-3572, 2005.



# 壁面漸近挙動モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験

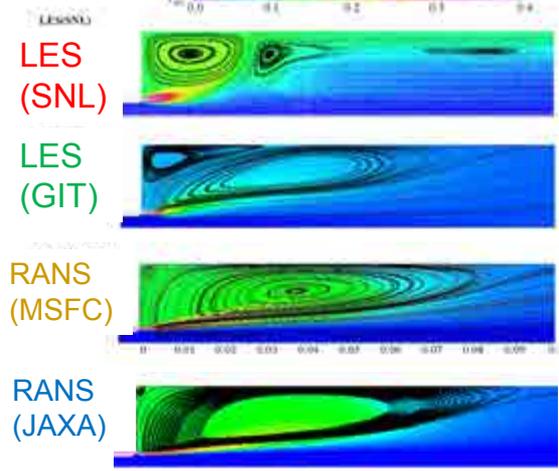
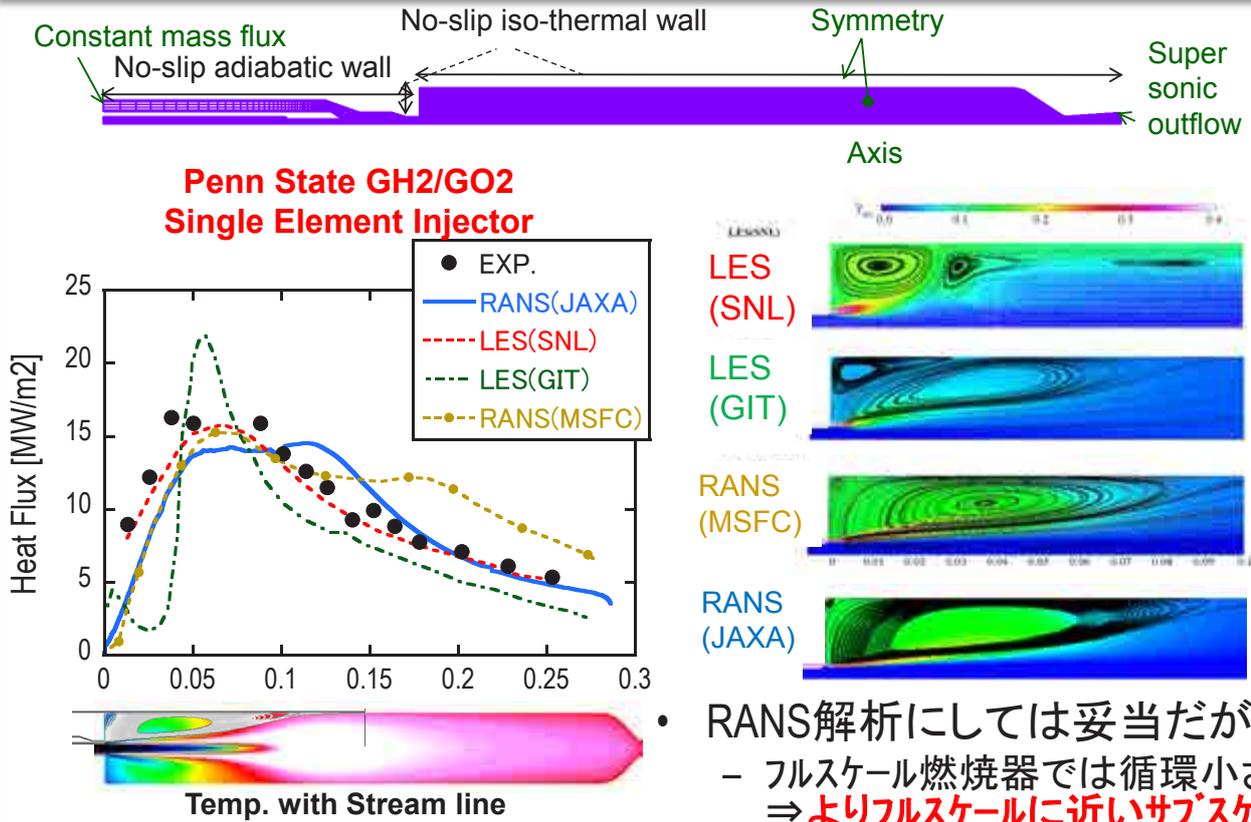
Single Element Injector

Expansion Tube



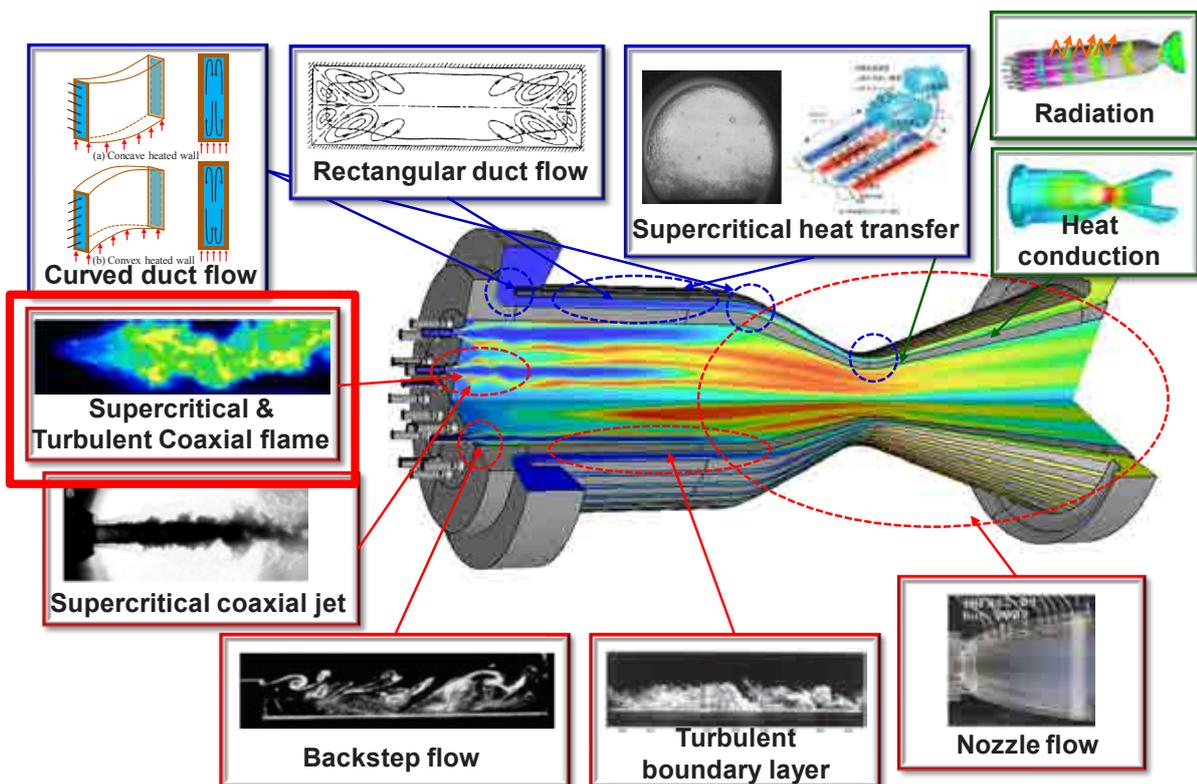
- シングルエレメント熱流束分布はModel 2の方が、Model1よりも良い結果を示している。
  - 拡大管と同じ傾向を持つ。
- シングルエレメントでは再循環領域における熱流束レベルを適切に評価できる壁面漸近挙動モデルを使う必要がある。

# 米国の結果との比較 GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験

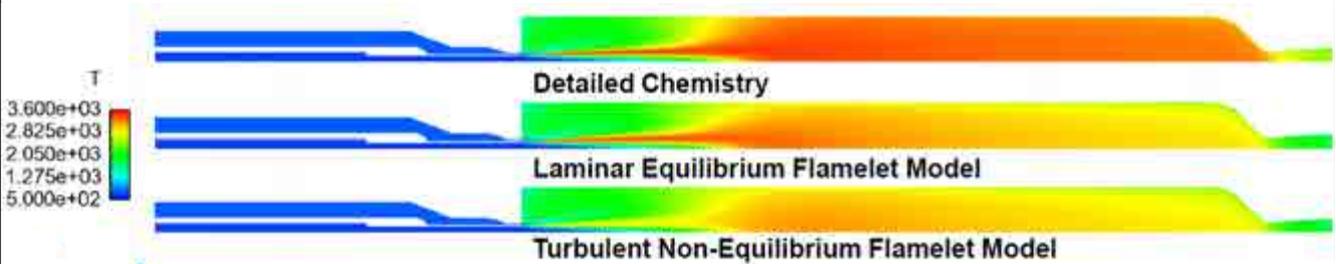


- RANS解析にしては妥当だが、
  - フルスケール燃焼器では循環小さい
  - ⇒ よりフルスケールに近いサブスケール燃焼器での検証が必要

# 燃焼モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験



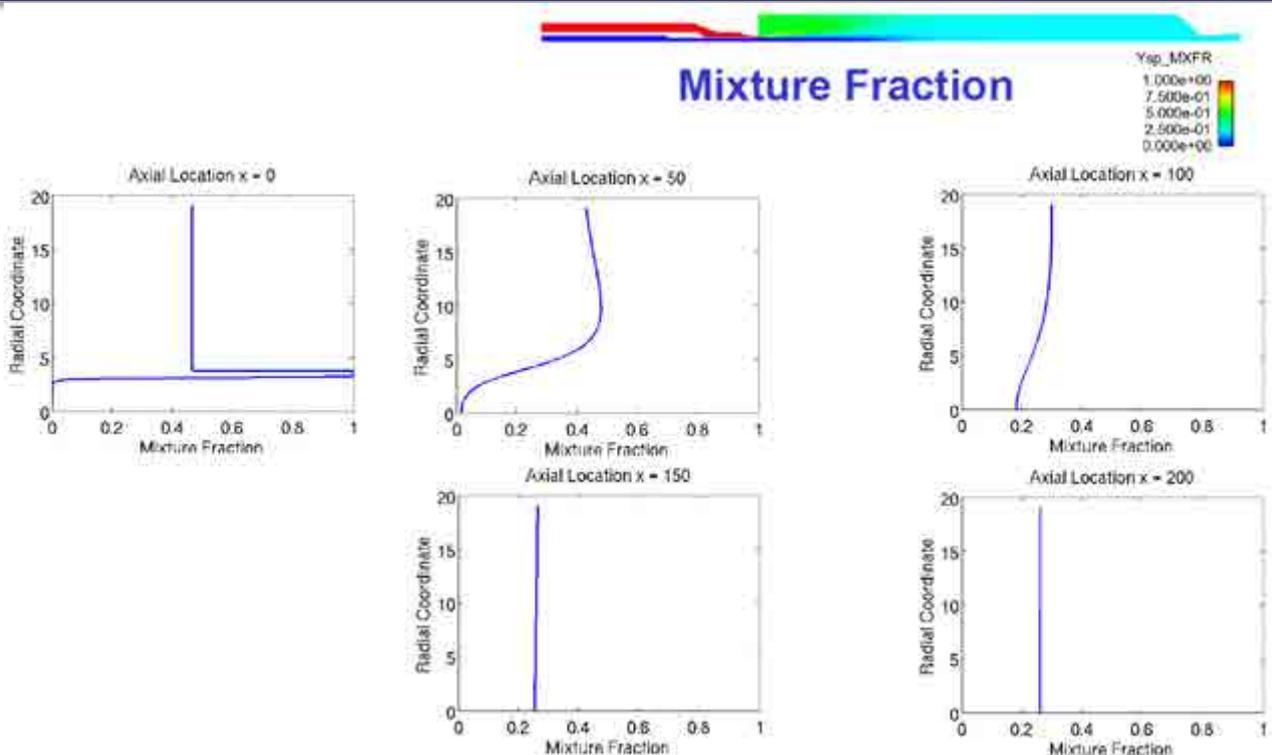
## 燃焼モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験



- Flameletモデルを導入し計算負荷の低減を狙った。
  - 【利点】
    - 方程式の数が詳細反応と比較して少ない。  
5+2+8本から5+2+2本に低減⇒計算速度約2倍
    - 副次的ではあるが解析が安定する。
  - 【欠点】
    - 熱損失、圧力変化を伴う系に適用するには改良が必要
- Laminar finite rateモデル(+詳細反応モデル)との比較。
  - 燃焼器下流にて詳細反応モデルよりも燃焼温度が低い。
  - 壁面近傍、ノズル内部での温度変化に差異が生じている。

19

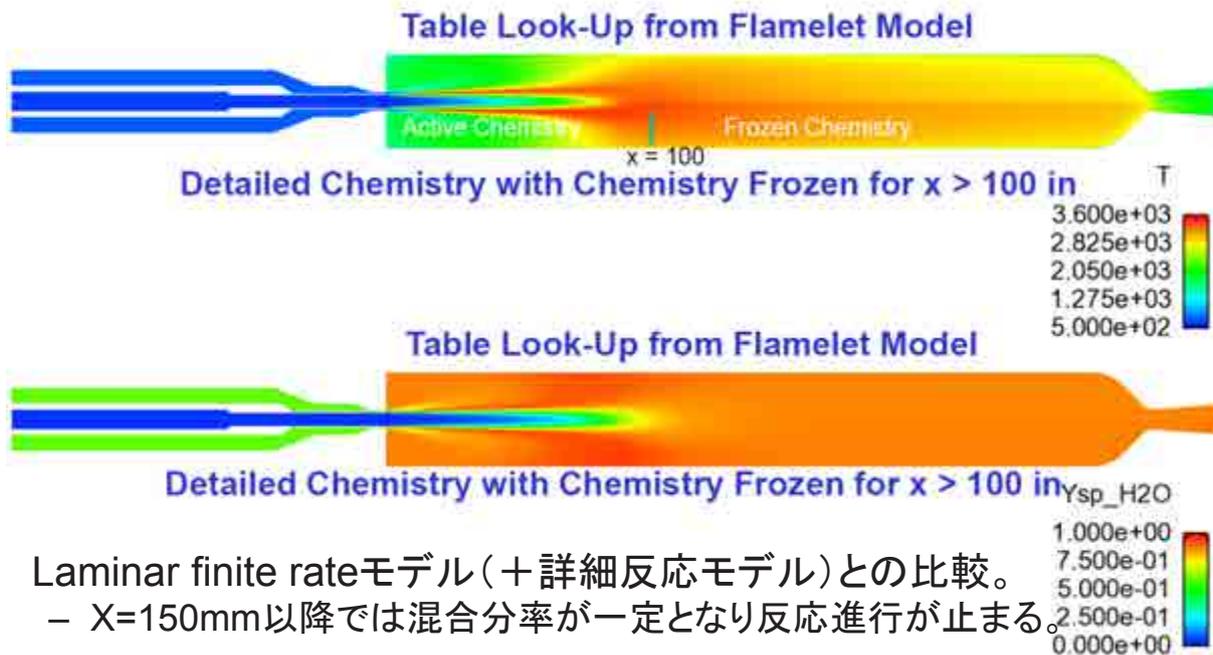
## 燃焼モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験



- Laminar finite rateモデル(+詳細反応モデル)との比較。
  - X=150mm以降では混合分率が一定となり反応進行が止まる。

20

## 燃焼モデル GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験



- Laminar finite rateモデル(+詳細反応モデル)との比較。
    - X=150mm以降では混合分率が一定となり反応進行が止まる。
- ↓
- 詳細反応モデルにてx=100mm以降で反応を強制的に凍結すると、Flameletモデルで観察された温度降下を再現できる。
  - ⇒ **【Flameletモデルの欠点】混合が起こらないと反応進行が止まる。**

21

## 燃焼モデル Flameletモデルの活用

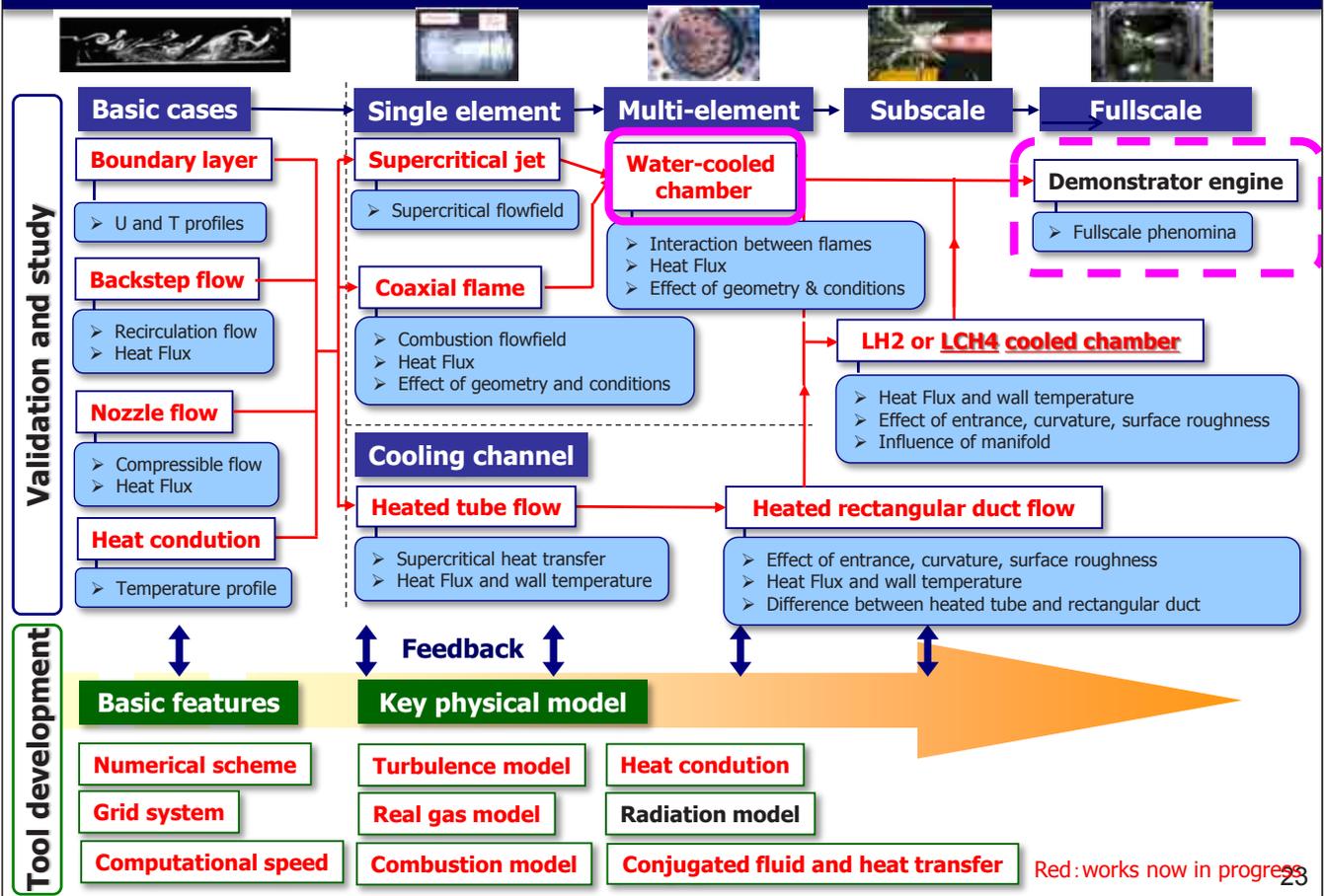
- Flameletモデルを導入し計算負荷の低減を狙った。
  - **【利点】**
    - 方程式の数が詳細反応と比較して少ない。  
5+2+8本から5+2+2本に低減⇒ **計算速度約2倍**
    - 副次的ではあるが解析が安定する。
  - **【欠点】**
    - 熱損失、圧力変化を伴う系に適用するには改良が必要
    - 混合が起こらないと反応進行が止まる。

初期解を効率的に作成するためにFlameletモデルを利用し、  
 最終解では詳細反応モデルを使用

⇒ **解析にかかる総時間が約1/3に低減**

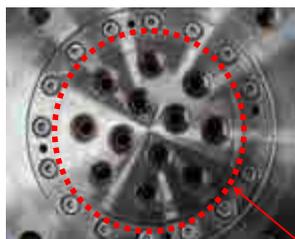
22

# サブスケール燃焼器による検証と簡略化手法検討

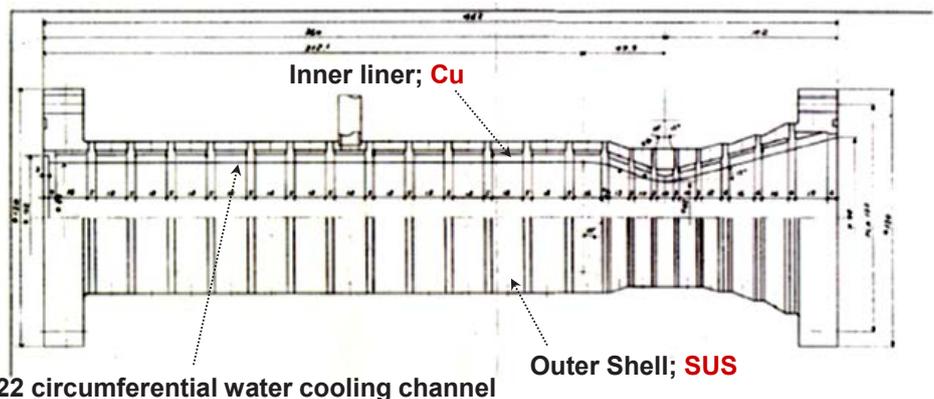


# サブスケール燃焼器による検証と簡略化手法検討

- 燃焼圧力: 5.0 MPa
- 混合比: 6.5
- 噴射速度比: 50
- 噴射温度: 99 K for GH2  
97 K for LOX



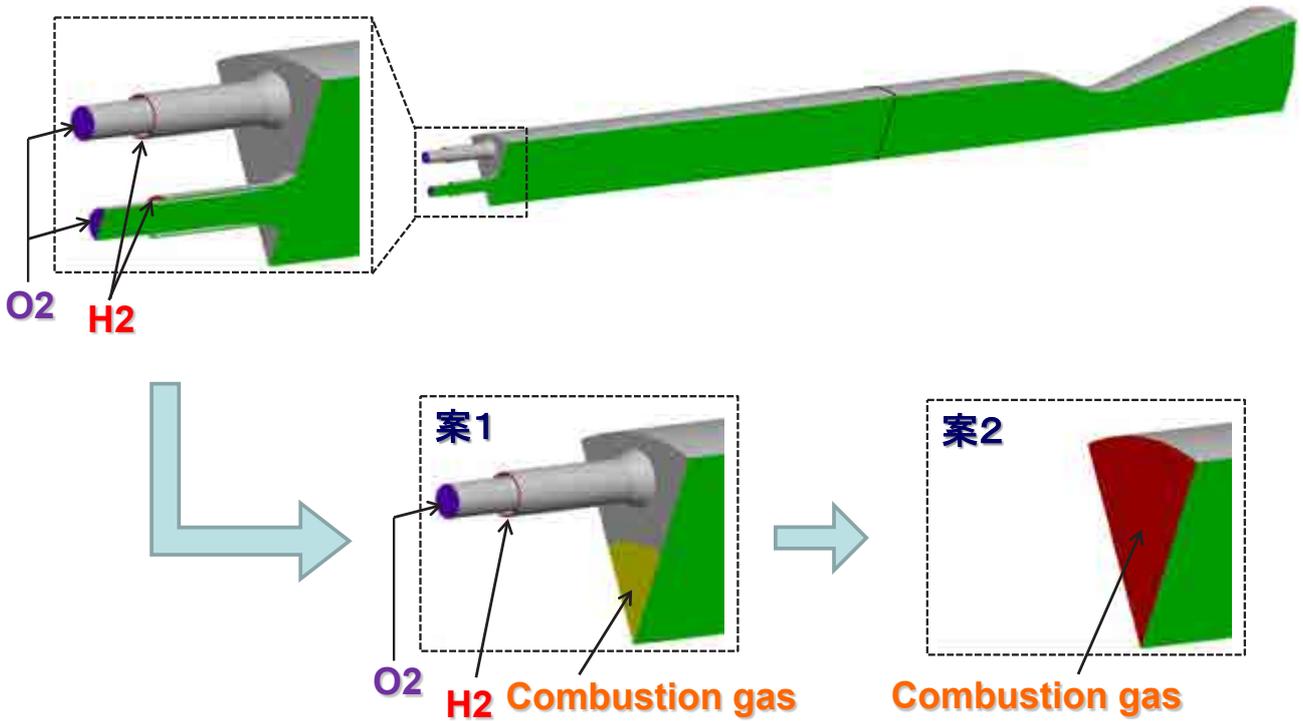
12 co-axial injector elements



Throat Diameter = 42 mm  
Face plate to Throat = 360 mm

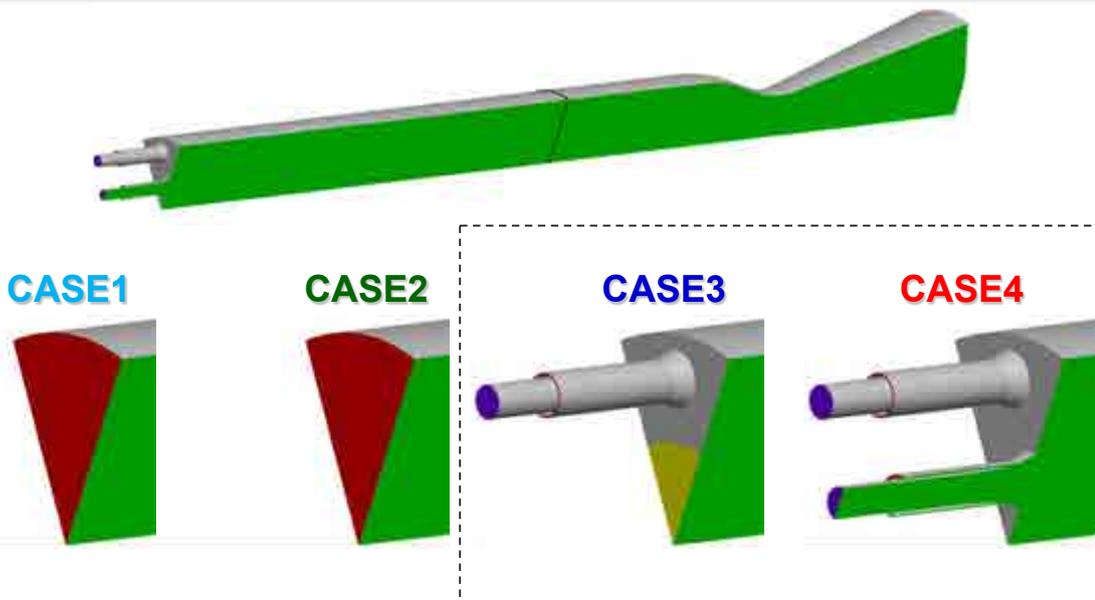
## サブスケール燃焼器による検証と簡略化手法検討

- **案1:** 壁面熱流束に大きな影響を有する最外周エレメントのみ考慮
- **案2:** エレメントを完全無視



25

## サブスケール燃焼器による検証と簡略化手法検討



**CASE1:** 全面燃焼ガス噴射、化学反応無

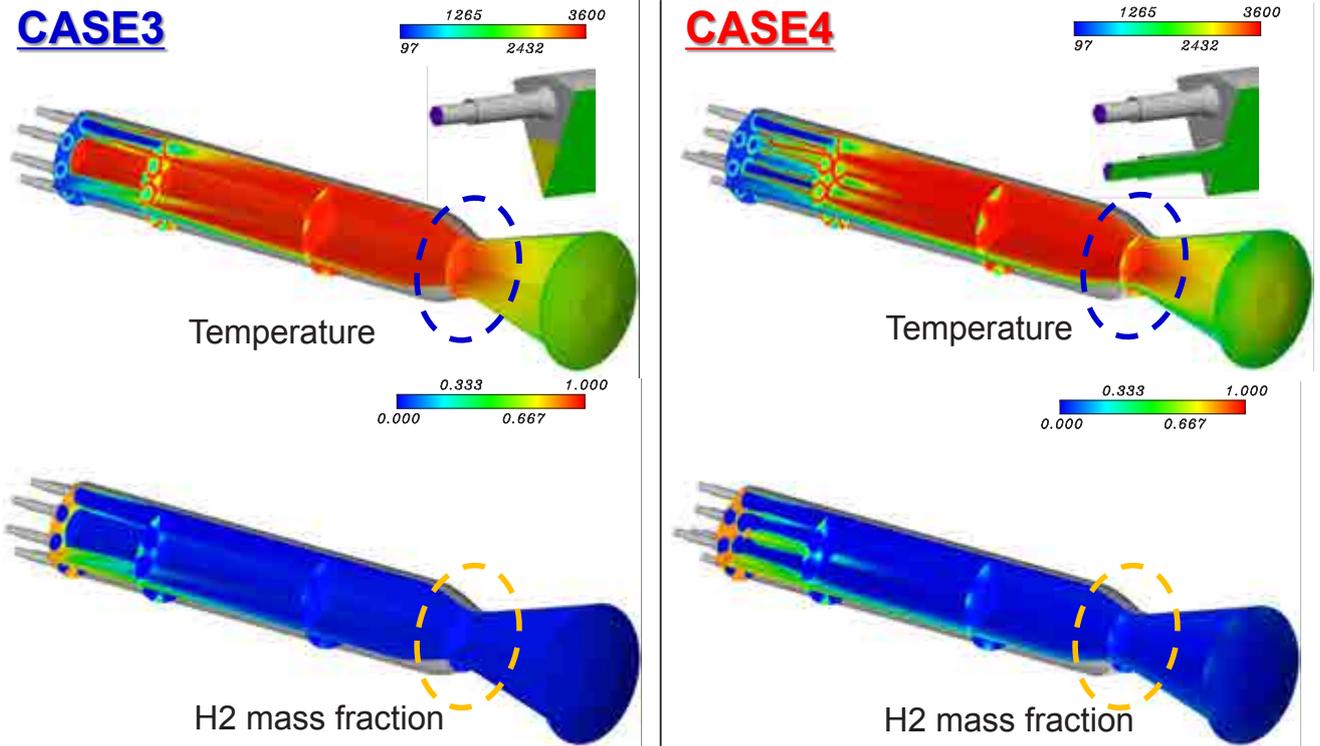
**CASE2:** 全面燃焼ガス噴射、化学反応有

**CASE3:** 最外周エレメント考慮、内側は燃焼ガスで模擬、化学反応有

**CASE4:** 実形状、化学反応有

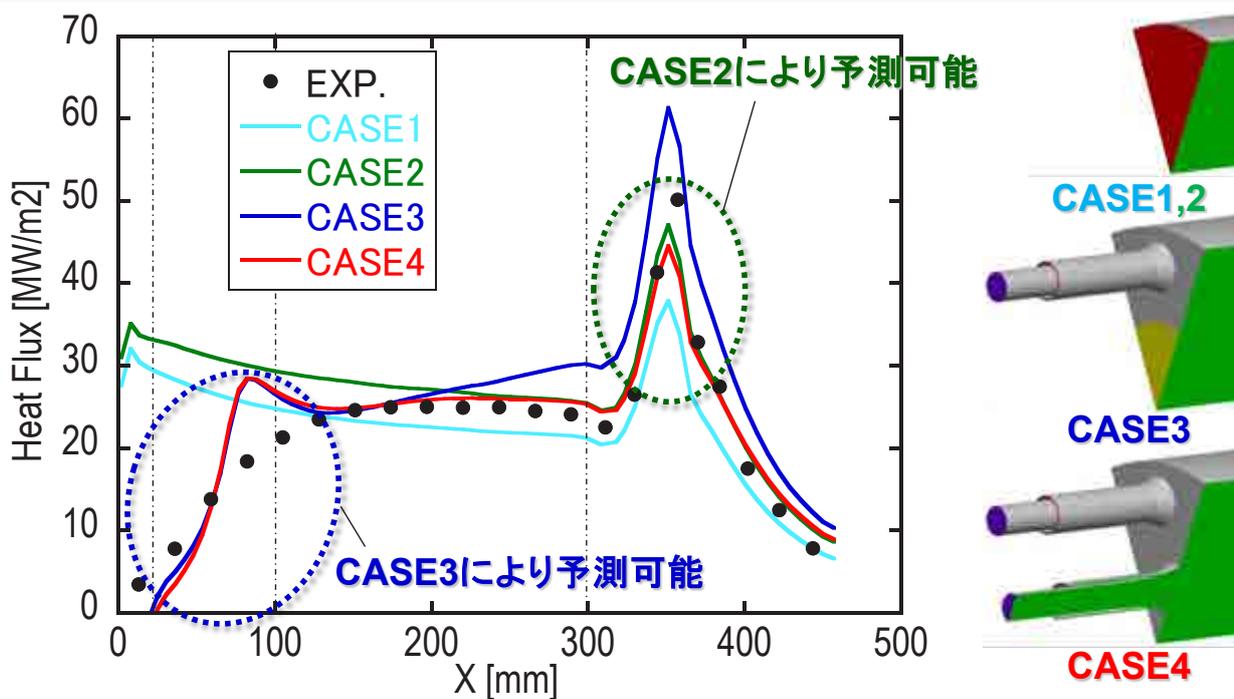
26

# サブスケール燃焼器による検証と簡略化手法検討



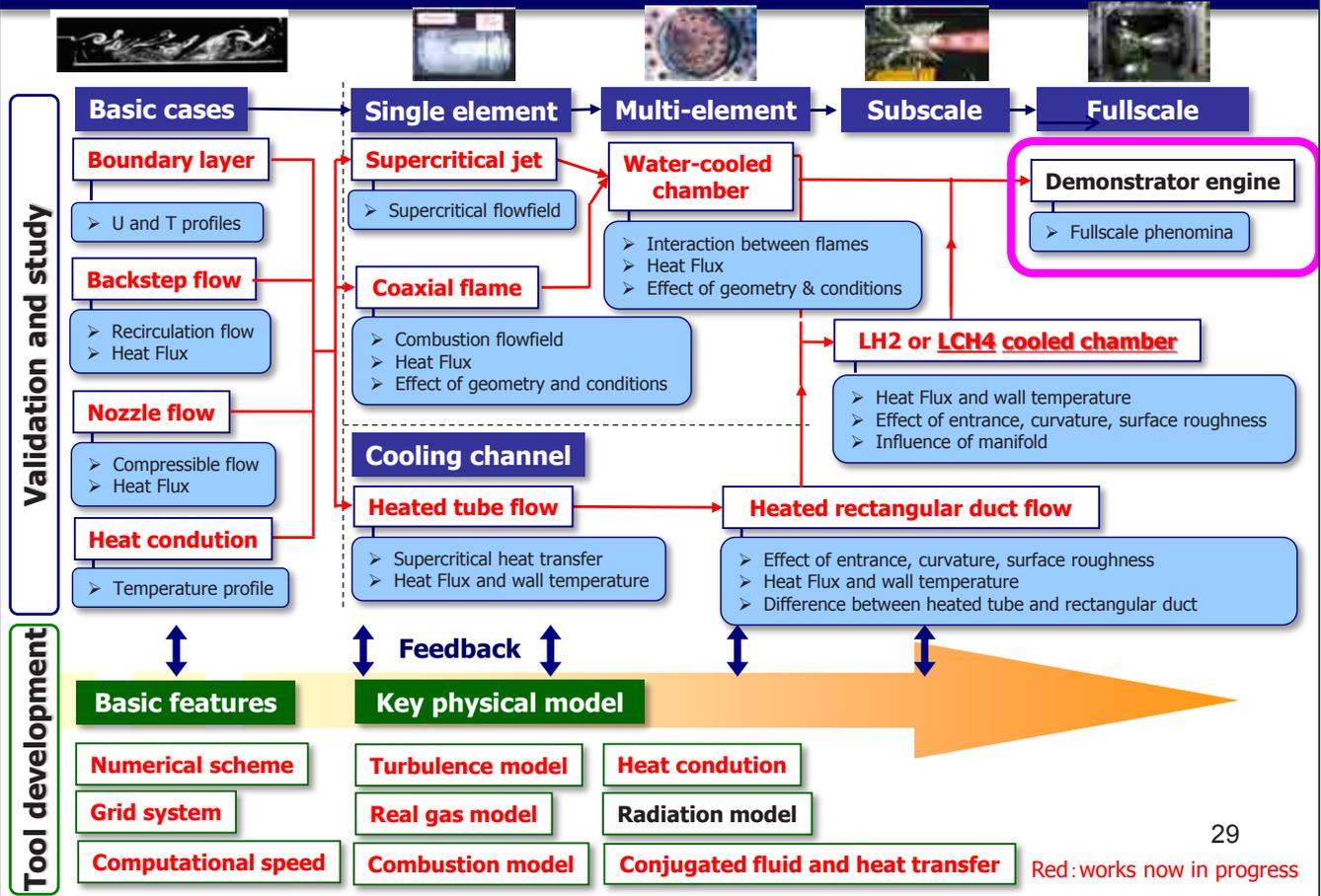
- 内側エレメント無視でも全体的な傾向は模擬できている
- 壁面近傍の未燃水素濃度に差異あり ⇒ 壁面熱流束分布に影響する可能性あり

# サブスケール燃焼器による検証と簡略化手法検討



- **Case 1 vs 2:** 化学反応の考慮は必須  
⇒ 温度境界層及びノズル温度低下による化学種組成が重要
- **Case 3 vs 4:** 内側エレメント無視による平行部下流での過大評価  
⇒ 壁面近傍を流れる未燃水素量の予測が重要

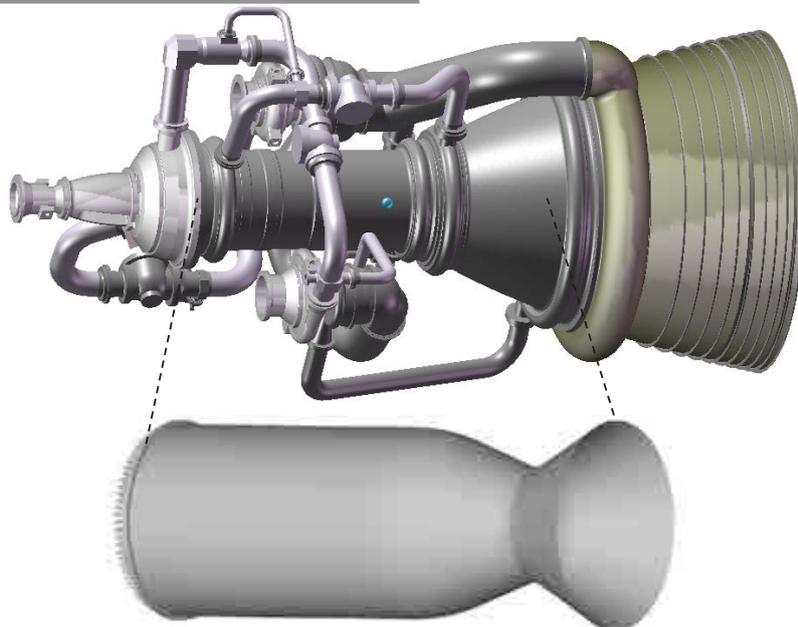
# フルスケール燃焼器 簡略化手法の適用



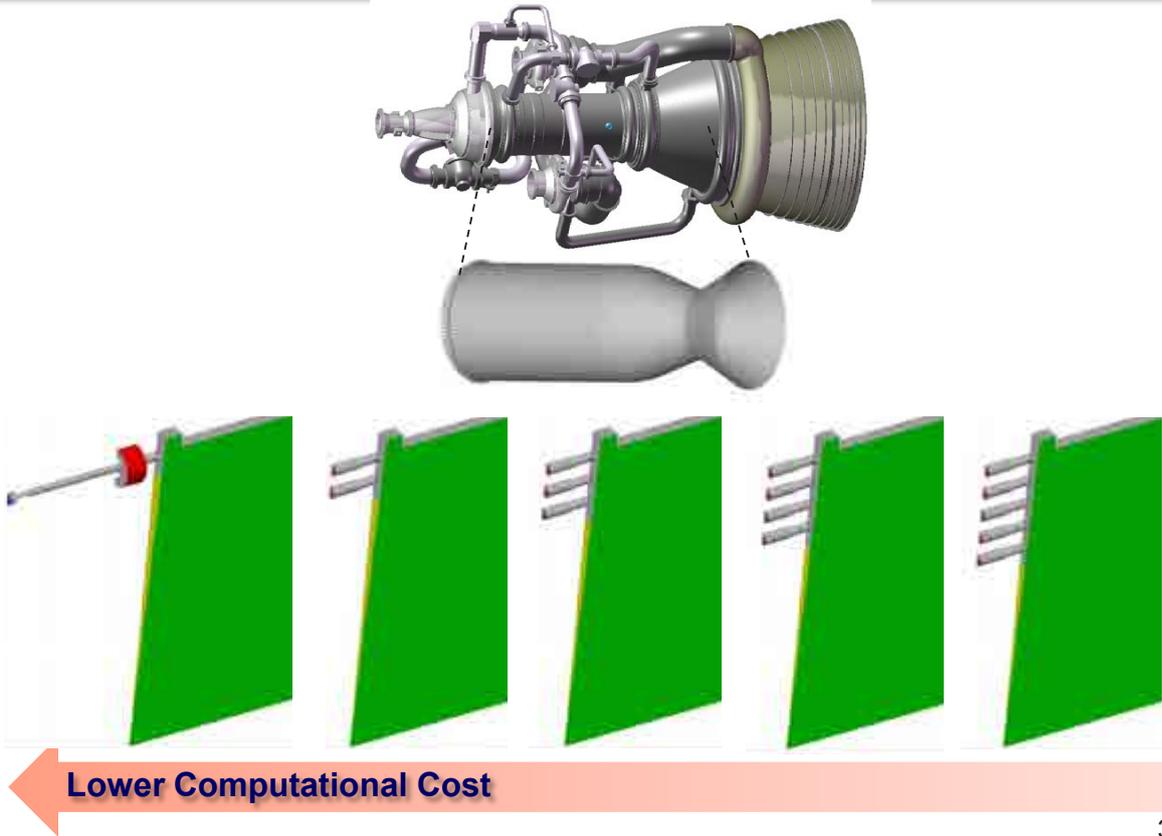
# フルスケール燃焼器 簡略化手法の適用

## ◆ フルスケール燃焼器 (LE-X)

- 燃焼圧力: 12 MPa
- 混合比: 6程度



# フルスケール燃焼器 簡略化手法の適用



31

最外周のエレメント列数を1-5列と変化させて熱流束に対する列数の影響を調査

# フルスケール燃焼器 簡略化手法の適用

- **解析領域:** 対象境界を利用したインジェクタ半分
- **総格子点数:** 約1000万点 ( $Y^+ < 1.8$ )

Wall: Non Slip + Temp. Profile

Outflow: Supersonic

Symmetry

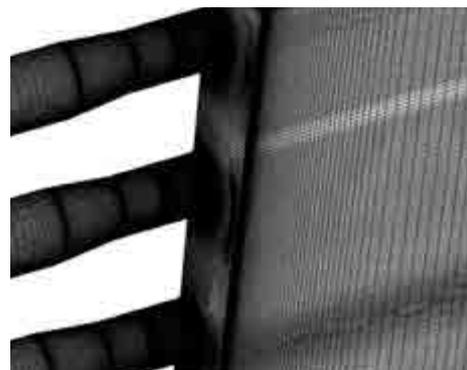
Inlet: Mass flux + Static Temp.

Wall: Non Slip + Adiabatic

O<sub>2</sub>

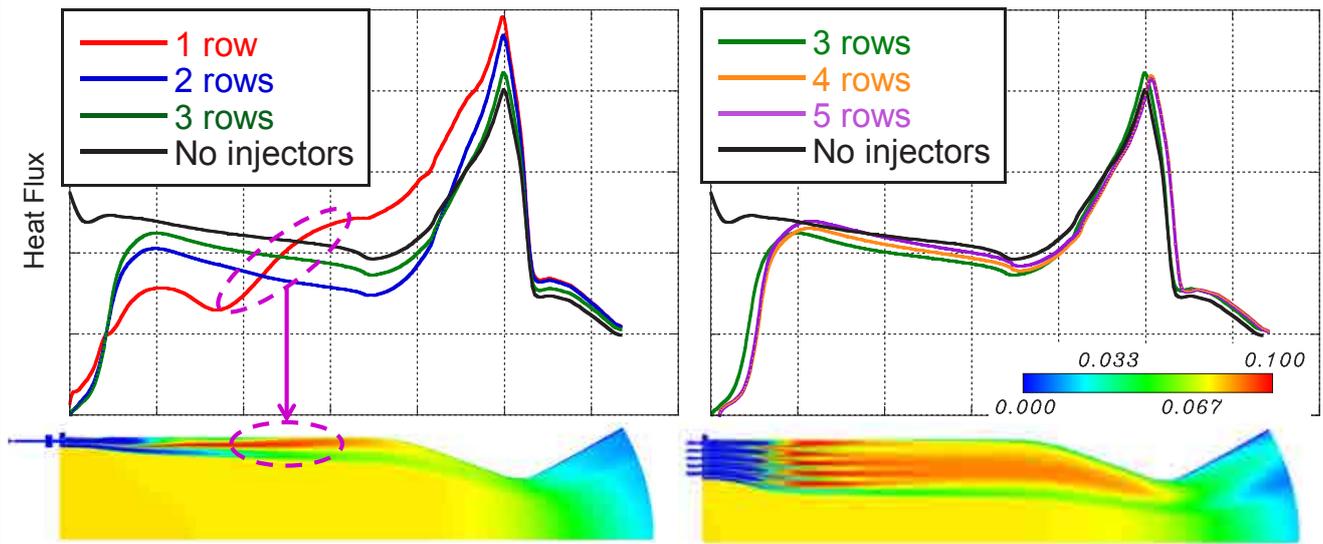
H<sub>2</sub>

Combustion Gas



32

## フルスケール燃焼器 簡略化手法の適用

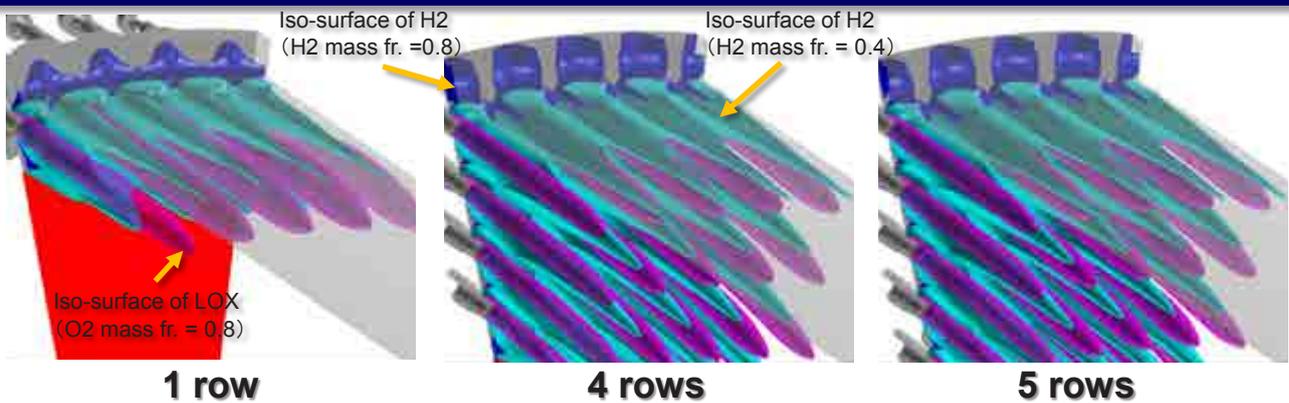


OH mass fraction distributions

- 外側インジェクタ5列を考慮することで解析結果は収束する。
- 収束解のノズル部分はインジェクタを考慮しない2次元軸対象解析結果に近づく。
  - ノズル部の2次元軸対象解析結果の信頼性はサブスケールで確認済み
  - ⇒ フルスケール燃焼器熱流束予測には**5列の解析結果を選択**

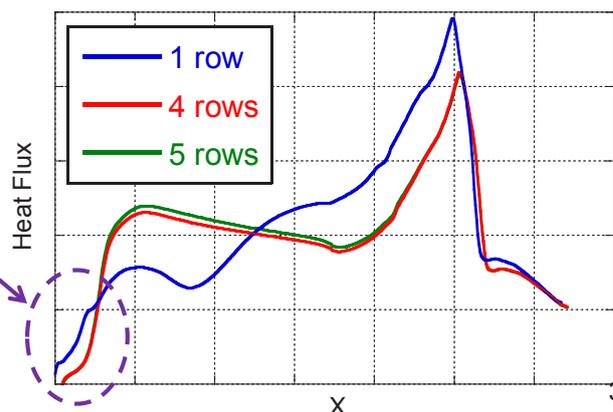
33

## フルスケール燃焼器 簡略化手法の適用



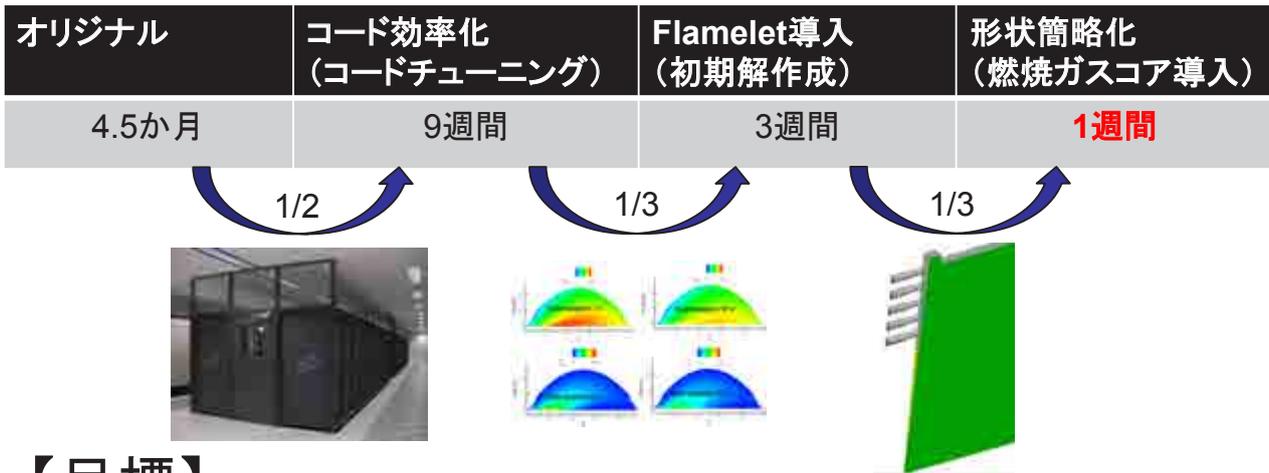
➤ 壁面近傍に存在する未燃の水素量は1列の方が、4-5列と比較して少ない

➤ 未燃水素量が少ないと壁面近傍の温度が高くなり熱流束が高くなる



34

# 効率的なモデリングによる解析時間の短縮

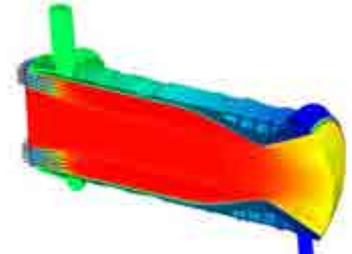


## 【目標】

- フルスケール燃焼器の再生冷却性能を数週間で評価する手法を開発する。

⇒ **目標ほぼ達成**

(冷却側とのカップリングを実施中  
AIAA JPC 2013にて発表予定)



35

## まとめ

- 「フルスケール燃焼器の再生冷却性能を数週間で評価する」という目標に向かい、物理モデル評価、検証解析、簡略化手法の燃焼ガス側壁面熱流束への影響検討を行った。

### – 物理モデル評価

- 壁面漸近挙動モデル
- 燃焼モデル

### – 検証解析

- 基礎非燃焼流れ
- シングル、マルチインジェクタ燃焼試験

### – 簡略化手法

- 内側インジェクタの簡略化

### – フルスケール燃焼器への適用 ⇒ 成功

36

## 残った課題と今後の目標

- 亜臨界圧燃焼

⇒微粒化モデル、噴霧燃焼技術の導入(井上先生発表)

- 非定常現象理解

⇒次の発表へ(JAXA松山氏)

⇒RCCEなどさらなる計算負荷軽減手法の実装(越先生発表)

⇒高次精度解析の燃焼場への実装(寺島先生発表)

**連携講座の知見のさらなる活用と実装(実現)**