

# 再使用観測ロケットエンジン再生冷却燃焼室の非破壊検査

## Nondestructive Inspection of Regenerative-cooling Combustion Chamber for Reusable Sounding Rocket Engine

佐藤正喜、橋本知之、森谷信一、木村俊哉、八木下剛、升岡正 (JAXA)、大村啓聡 (JAST)、高木寛之、藤井拓也、佐藤克利 (日立製作所)

### 1. 背景および目的 ..... 再使用化のためのキーとなるエンジン要素 ⇒ 再生冷却燃焼室

#### 【背景】

- ◆ 再生冷却燃焼室 ⇒ エンジン寿命を規定する重要要素
  - ✓ わずか1mm程度の内壁を隔て、冷却剤側は極低温冷却剤 (液体水素) に、燃焼室側は約3000Kの燃焼ガスに晒される
  - ✓ エンジンの起動・停止に伴う熱サイクルの繰り返しにより、熱ひずみが蓄積して内壁が変形し、やがて損傷に至る
- ◆ エンジン再使用化 ⇒ 寿命管理のための非破壊検査技術
  - ✓ 損傷の有無だけでなく、損傷に至る前の予兆を把握することが重要
  - ✓ 数値解析モデルへの反映により、損傷度や余寿命の評価精度向上へ

#### 【目的】

- 再使用観測ロケットエンジンの再生冷却燃焼室を対象として
- ◆ 非破壊検査手法としての検出能力の確認
  - ◆ 微小変形・微小損傷の定量的把握

再生冷却燃焼室

再使用観測ロケット技術実証エンジン

推進剤	LOX/LH2
推力制御範囲	40 ~ 100%
推力	16 ~ 40 kN
燃焼圧 Pc	1.6 ~ 3.4 MPa
混合比 MRC	6.8

累積起動停止回数 142回  
累積燃焼時間 3,785秒  
フライト運用 117回相当

### 2. 高エネルギーX線CTによる内面形状・冷却溝板厚評価 ..... 画像解析による高精度定量的評価の試み (オフサイト検査、約4日間)

#### 【X線CT撮像】

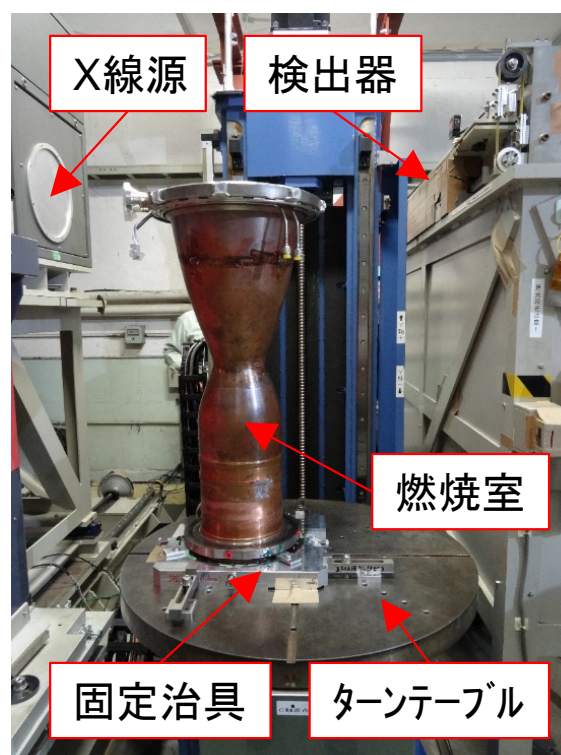
- ✓ 透過能力に優れた高エネルギーX線源
- ✓ 高速撮像と高分解能を両立した撮像方式 (Hi-Brid撮像)
- ✓ 噴射面側からノズル側へ、等間隔の15断面で撮像
- ✓ 燃焼試験シリーズの前、途中、後に計4回の継続的撮像
- ✓ 所要日数: 約4日間 (取外し1日、撮像2日、取付け1日)

#### ● X線CT装置の緒元

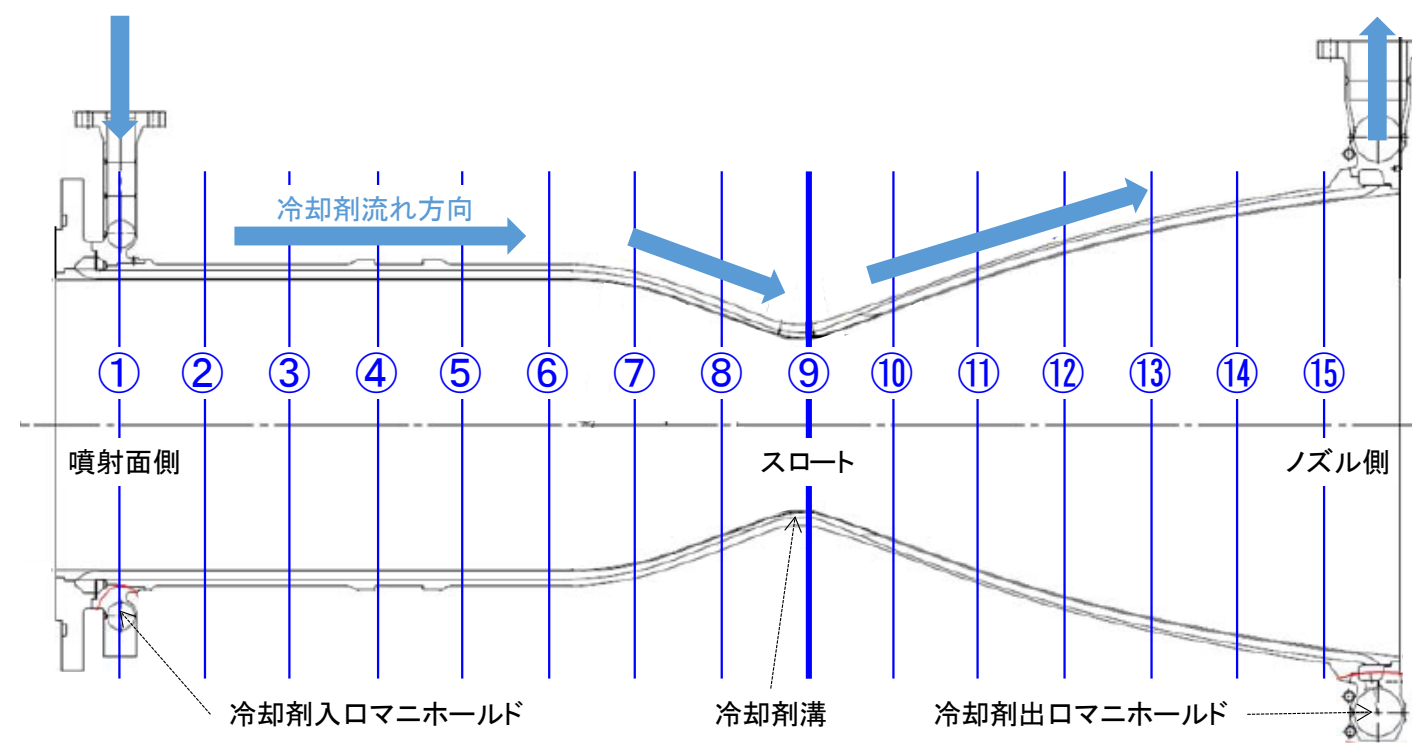
項目	緒元・仕様
X線CT装置	日立製作所製 HiXCT-9M-SP
X線最大エネルギー	9MeV
撮像視野	直径600mm × 高さ1000mm
検体最大重量	100kg
撮像方式	Hi-Brid (高精度・日立オリジナル)
撮像スライス厚	0.5mm
CT画像サイズ	3000pixel × 3000pixel
CT画素サイズ	0.2mm × 0.2mm

※の項目については今回採用したものを記載、他にオプション有

#### ● 撮像セットアップ



#### ● 撮像位置

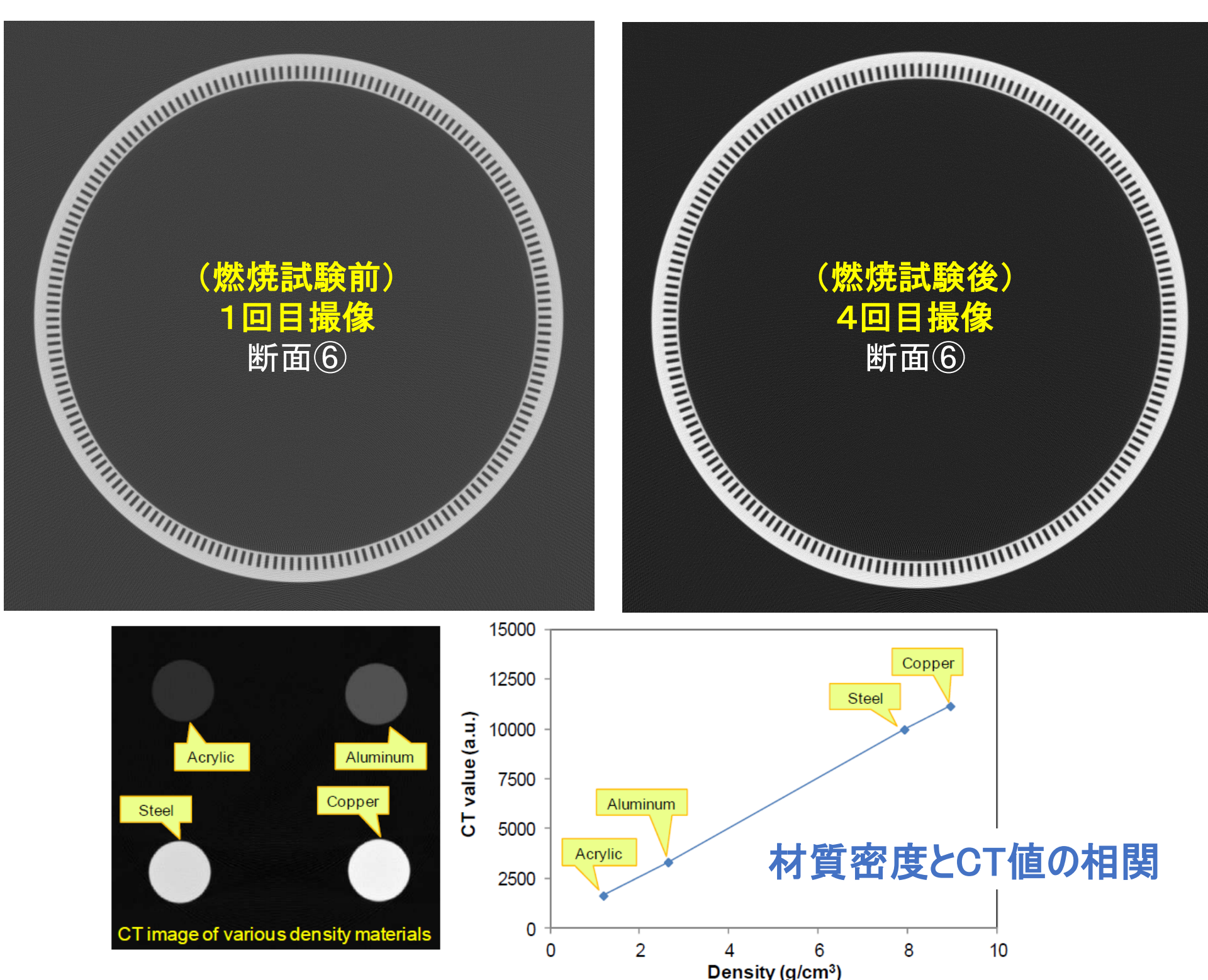


#### ● 撮像履歴

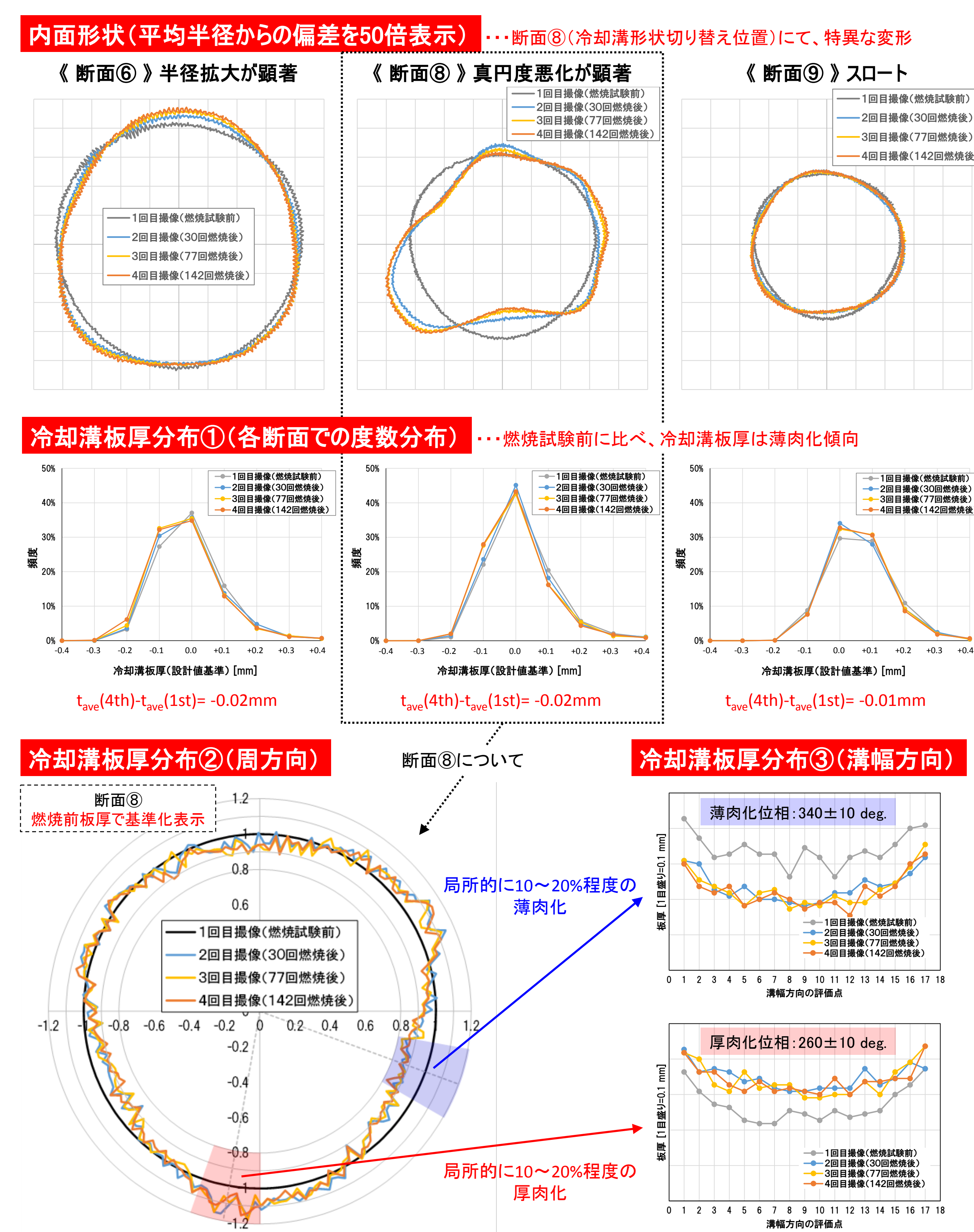
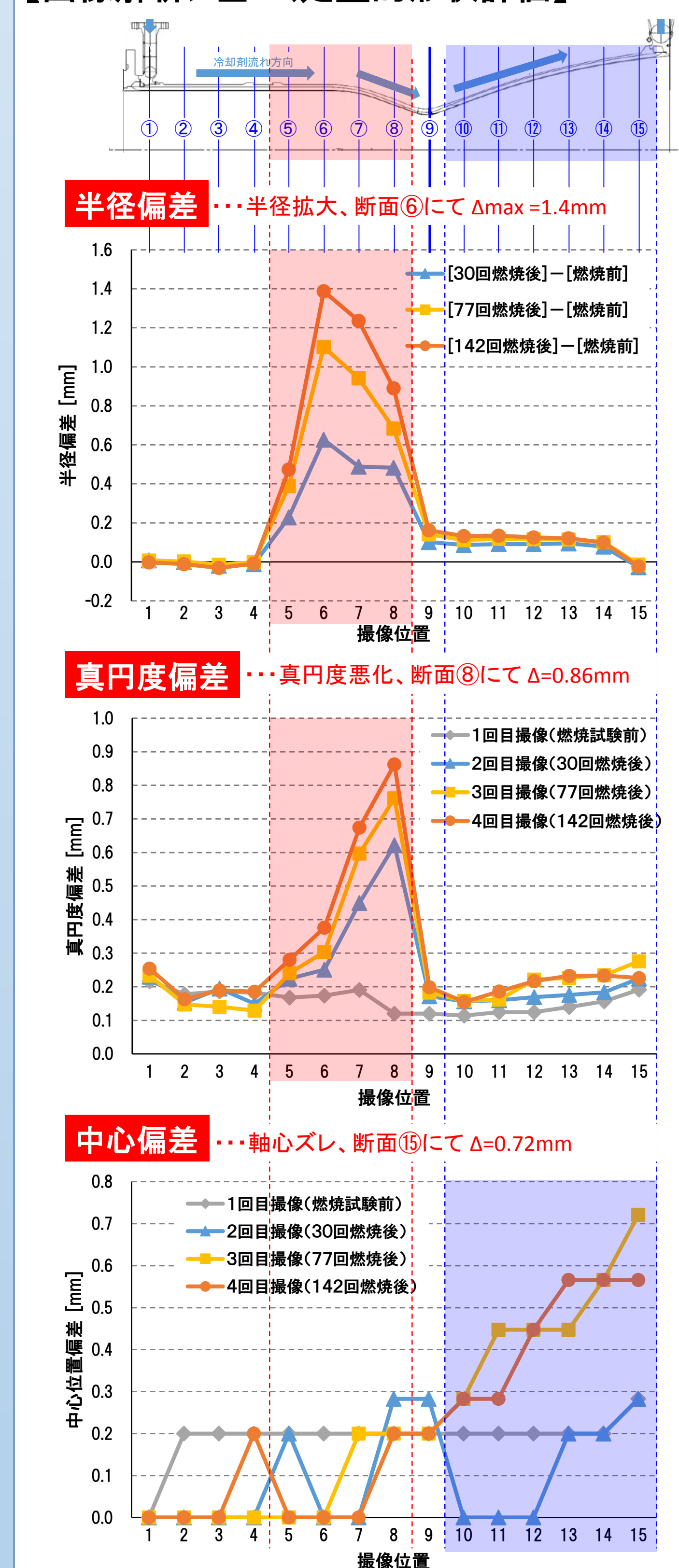
撮像回数	撮像時期	燃焼室試験履歴		累積損傷度 (754回換算値)
		1/4着火回数 (累積)	燃焼時間 (累積)	
1回目	2014/ 3/17~18	0回	0秒	0 754回相当
燃焼試験 基本性能確認 (試験回数: 10回)				
2回目	2014/11/19~20	30回	1359秒	17 754回相当
燃焼試験 高度機能確認 (試験回数: 15回)				
3回目	2015/ 1/ 5~ 6	77回	2327秒	59 754回相当
燃焼試験 寿命確認/前半 (試験回数: 12回)				
4回目	2015/ 2/18~19	142回	3785秒	117 754回相当
燃焼試験 寿命確認/後半 (試験回数: 17回)				

#### 【X線CT画像】

- ✓ 1画素 (0.2mm/pixel) あたり、16bitの階調 (CT値)
- ✓ CT値は材質密度と程良い比例関係を示し、鮮明な画像取得が可能
- ✓ 変形有無については判断が困難 ⇒ 画像解析技術による定量的評価



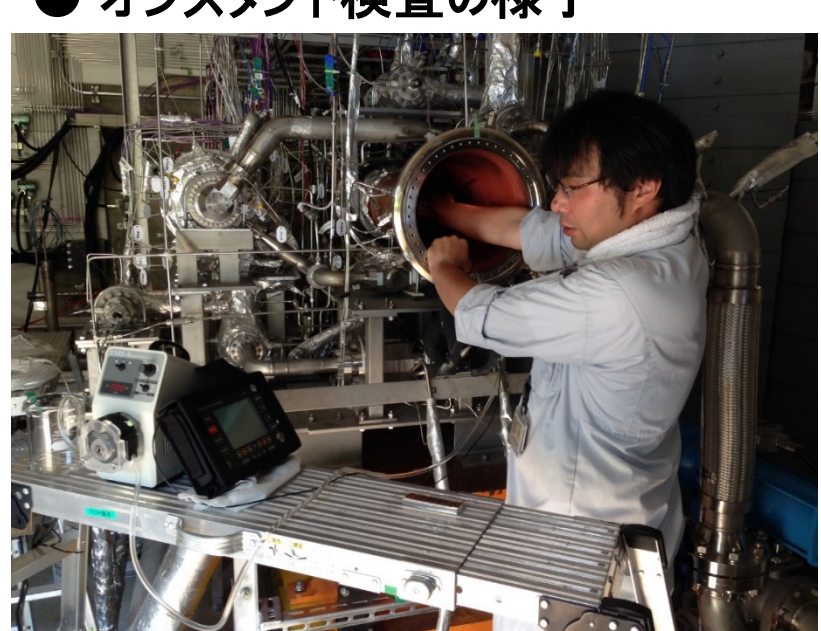
#### 【画像解析に基づく定量的形状評価】



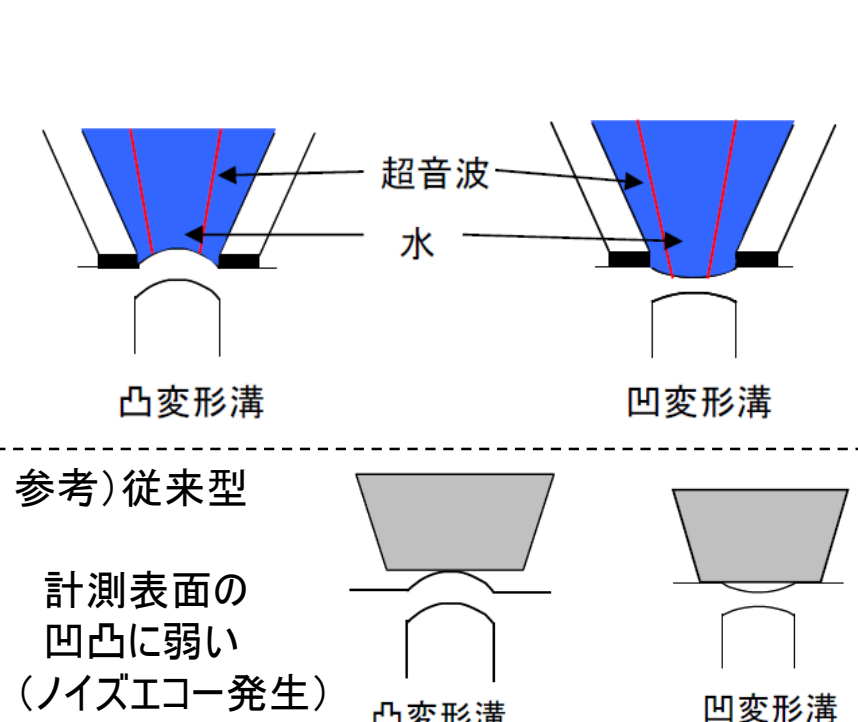
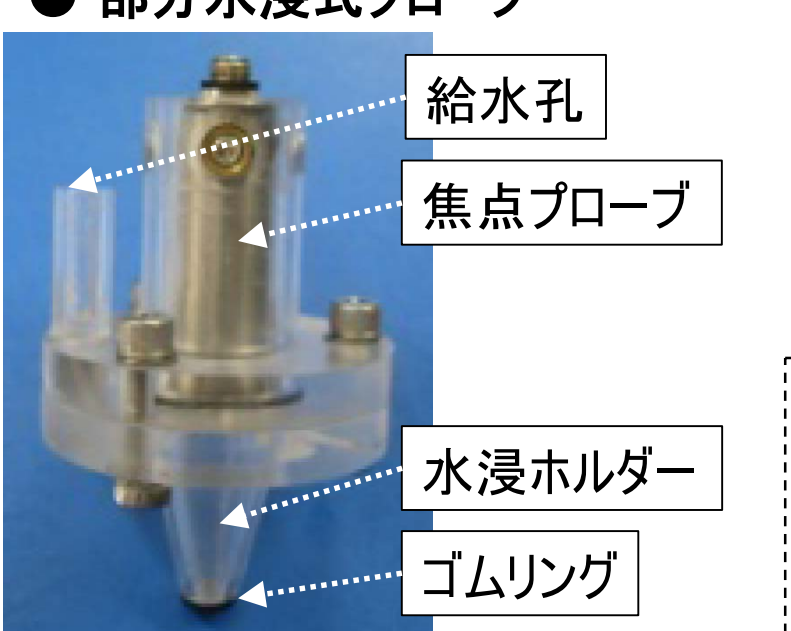
### 3. 超音波板厚計測による冷却溝板厚評価 ..... 現場での簡易検査のための試み (オンサイト検査、約1時間)

- ✓ 形状追従性を重視した部分水浸式プローブの採用
- ✓ 燃焼室スロートの4位相 (上下左右) での冷却溝板厚を計測 (計測前には毎回、校正用銅板を用いた校正計測を実施)
- ✓ 毎試験日、試験終了後にオンサイトで計測実施
- ✓ 所要時間: 約1時間

#### ● オンスタンド検査の様子

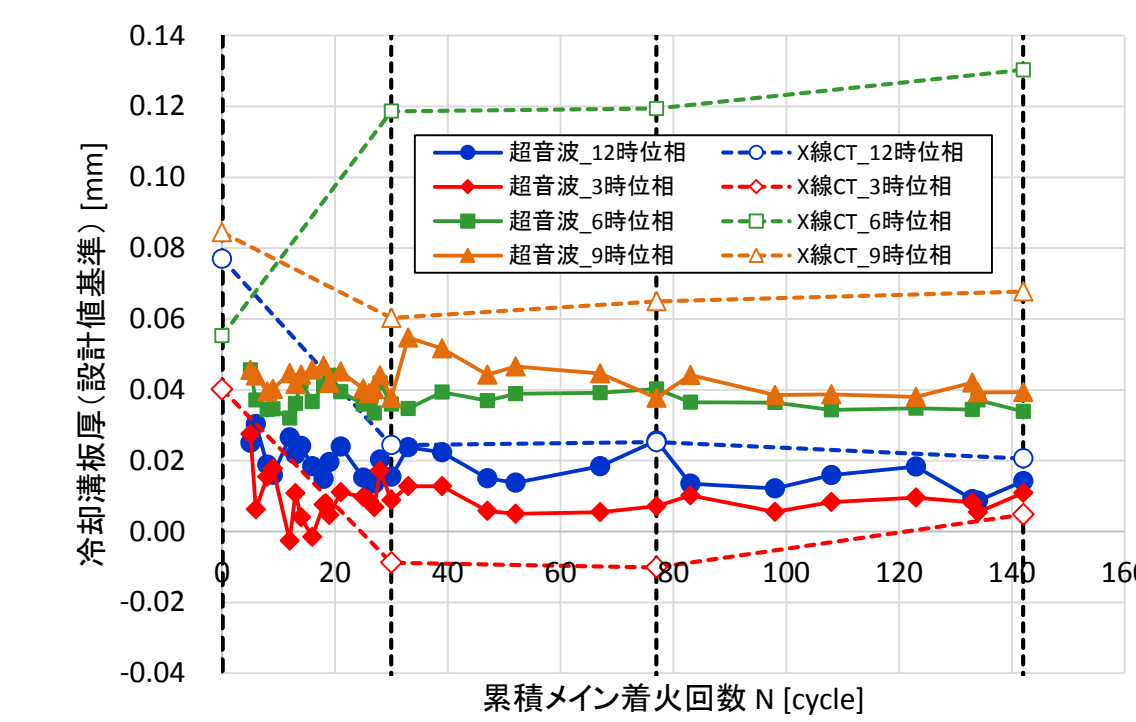


#### ● 部分水浸式プローブ



#### ● 計測結果

- ✓ X線CT結果と比較
- ✓ 絶対値は異なるが定性的な傾向は一致
- ✓ 試験間の相対評価に有効
- ✓ 絶対値評価のためには精度向上が必要



### 4. まとめ ..... 成果概要および今後の方針

- 高エネルギーX線CTに関しては、撮像したCT画像を元に画像解析技術駆使することにより、燃焼室内面の微小変形や冷却溝板厚の定量的評価が可能であることを示した。
- 超音波板厚計測に関しては、絶対値に若干の相違はあるもののX線CT結果と定性的な傾向は一致。オンスタンドで試験間に実施する簡易検査としての有効性を確認した。
- 検査パフォーマンス (容易性 vs 精度、時間、コスト) を勘案し、高頻度運用実現のためのメンテナンスプラン検討に反映する。
- 多数回燃焼を経験した同一燃焼室において、これほどまでに継続的に形状変化を定量的に計測・評価した結果は世界にも例を見ず、貴重なデータが得られた。今後これらを活用して、損傷度解析モデルへの反映および余寿命評価技術の精度向上を目指す。