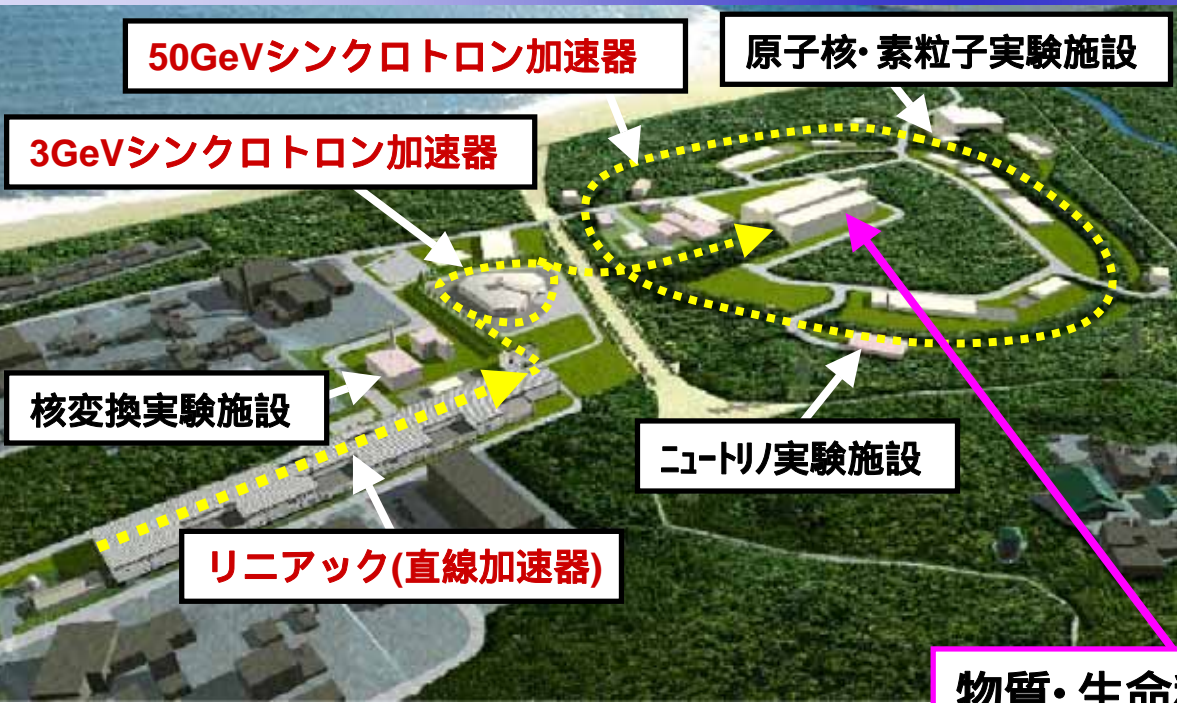


パルス陽子ビーム入射による 水銀ターゲットの圧力波解析

日本原子力研究所 東海研究所
大強度陽子加速器施設開発センター 中性子施設開発グループ

佐藤 博 石倉修一

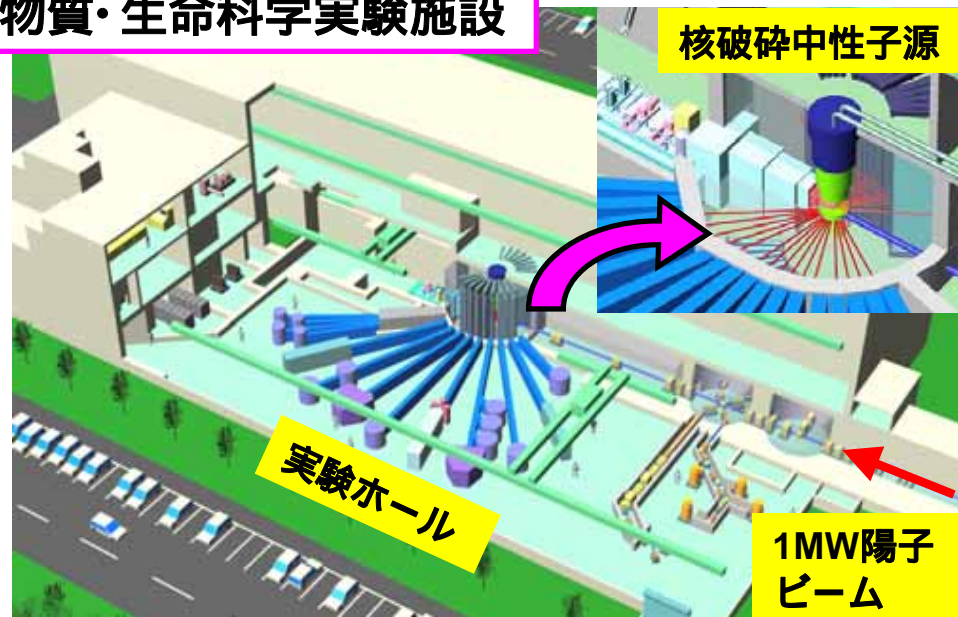
大強度陽子加速器計画 (J-PARC)



日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構の共同プロジェクトである大強度陽子加速器計画は現在、茨城県東海村で建設が行われている。左図に加速器群と主な施設の配置を示した。

物質・生命科学実験施設

本計画の中核施設の1つである物質・生命科学実験施設では、1MWのパルス陽子ビームを核破砕中性子源に入射することで発生するパルス中性子を利用して、生命科学、物性物理、核物理等の広範囲な分野で先端的な研究を行う。



核破砕中性子源

冷減速材システム
(水素循環系：1.5MPa、20K)

1MW陽子
ビーム

扁平型冷減
速材容器

水銀ターゲット

円筒型冷減
速材容器

反射体

水銀ターゲット容器の概略

水銀

ターゲット容器

ビーム窓部

ビームダンブ

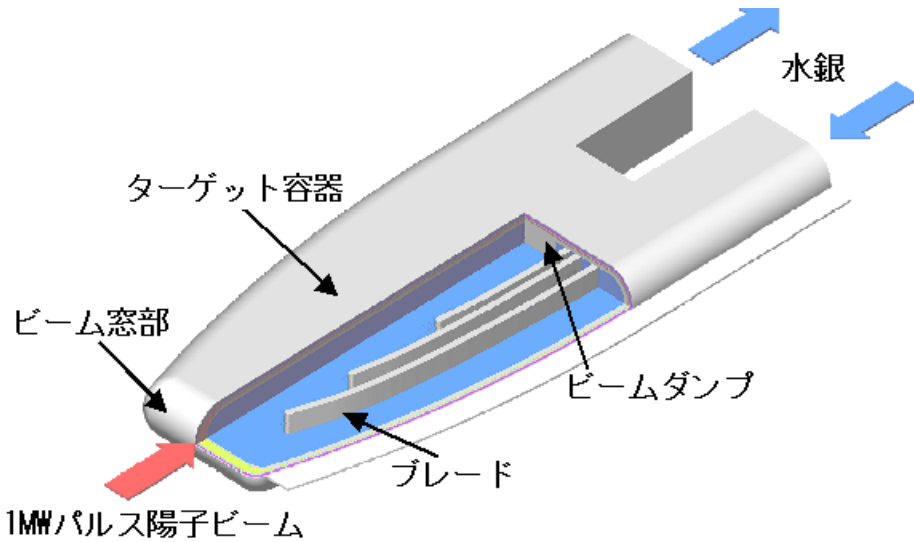
ブレード

1MWパルス陽子ビーム

核破砕中性子源は、大強度のパルス陽子ビームによる核破砕反応で効率的に中性子を発生する水銀ターゲット、その発生した中性子を減速材に集める反射体、中性子を研究用途に合うエネルギーに減速する減速材等から構成される。

ターゲット材である水銀は、陽子ビームと直交するようにターゲット容器内を流れ、水銀内部では核破砕反応により高密度の熱が発生する。ターゲット容器はステンレス鋼製で、現在はSUS316LNを使用する。

核破砕中性子用水銀ターゲット



材料：SUS316LN

主要寸法

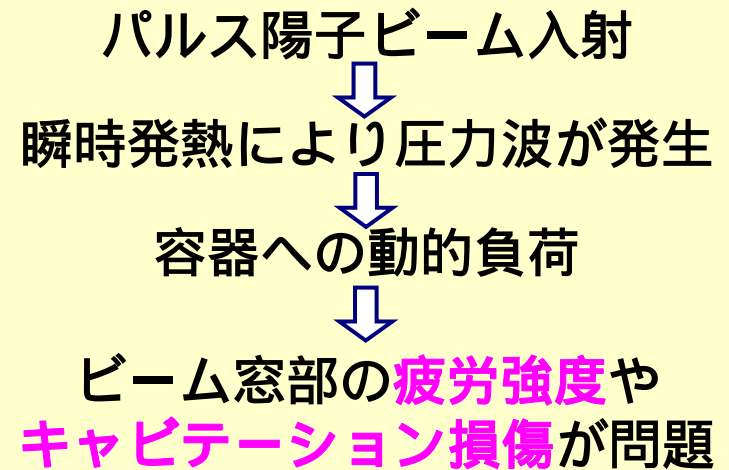
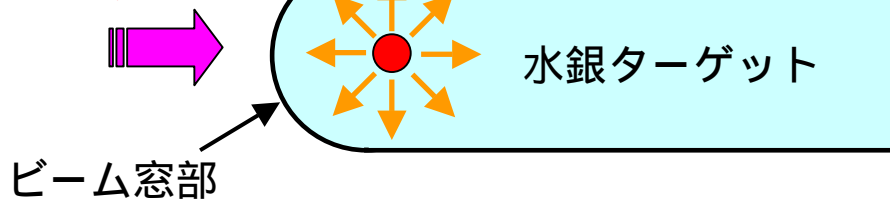
高さ：80 mm

幅：260 mm (ビーム窓部)

有効長さ：800mm

(ターゲット容器本体寸法)

パルス陽子ビームの入射
1MW, 25Hz



核破砕中性子源用水銀ターゲットの設計を行う上で、ターゲット容器に与えられる動的応力を高精度に予測することは重要である。

RADIOSSの導入

現在、水銀ターゲットの圧力波解析は有限要素法による汎用衝撃解析コードLS-DYNAを用いて行っている。LS-DYNAには以下の特徴がある。

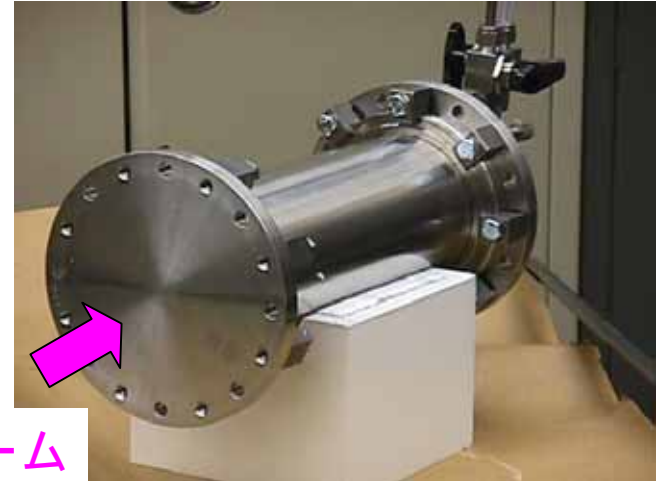
- ・使用可能な材料の構成方程式の種類は豊富で、固体の衝撃問題に対して殆どの問題に対応可能であり、実績も多い。
- ・しかしながら、流体を扱う場合、オイラー形式は使用範囲が限られる、状態方程式のモデル化に制限がある等の欠点がある。

ターゲットの圧力波解析では水銀のモデル化が重要となるため、流体の特徴をより厳密に取り扱えるRADIOSS-CFDを導入することで水銀ターゲットの圧力波解析の高精度化が図れると考えられる。

今回はRADIOSS-CFDによる解析が準備中のため、LS-DYNAとRADIOSS-CRASHの比較を行った解析について報告する。

解析対象と解析の流れ

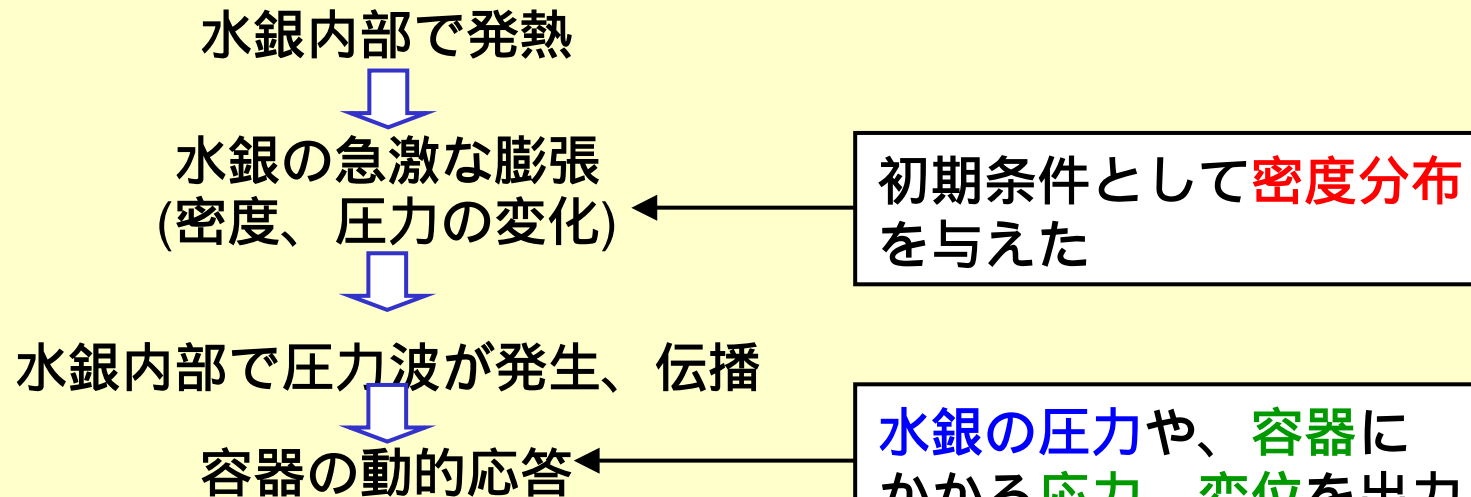
RADIOSSによる解析結果と、現在使用しているLS-DYNAとの比較を行った。解析対象は、米国のオークリッジ国立研究所が陽子加速器を用いて行った模擬水銀ターゲットモデルの動的熱衝撃応答である。



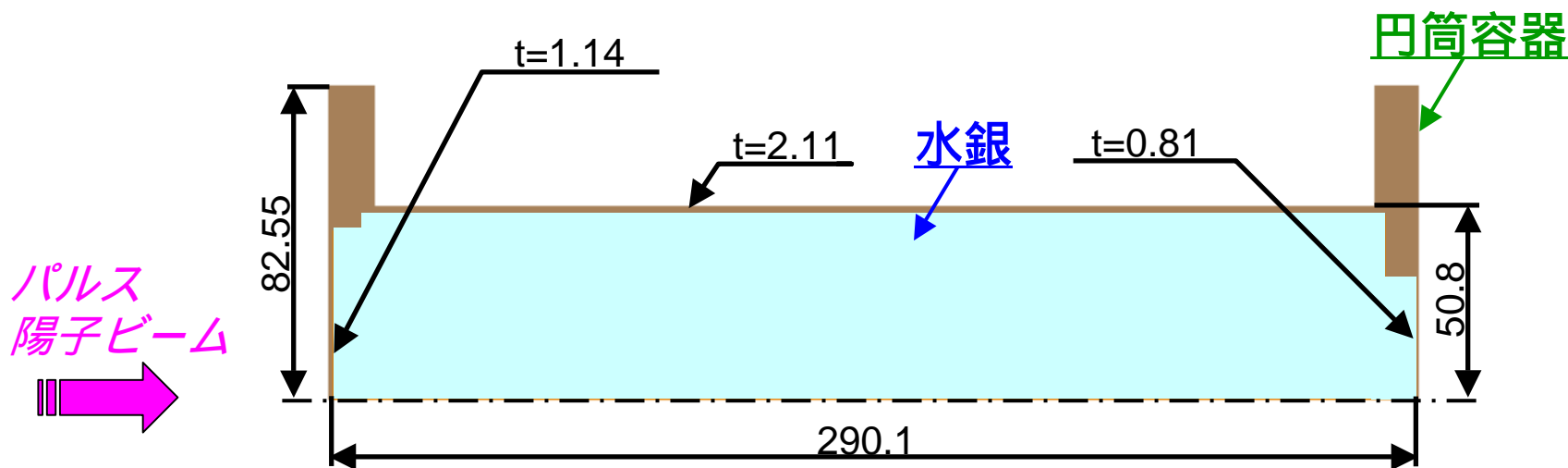
陽子ビーム

模擬ターゲットモデル

解析の流れ



解析モデル



解析は1/4モデルを用いて行った。

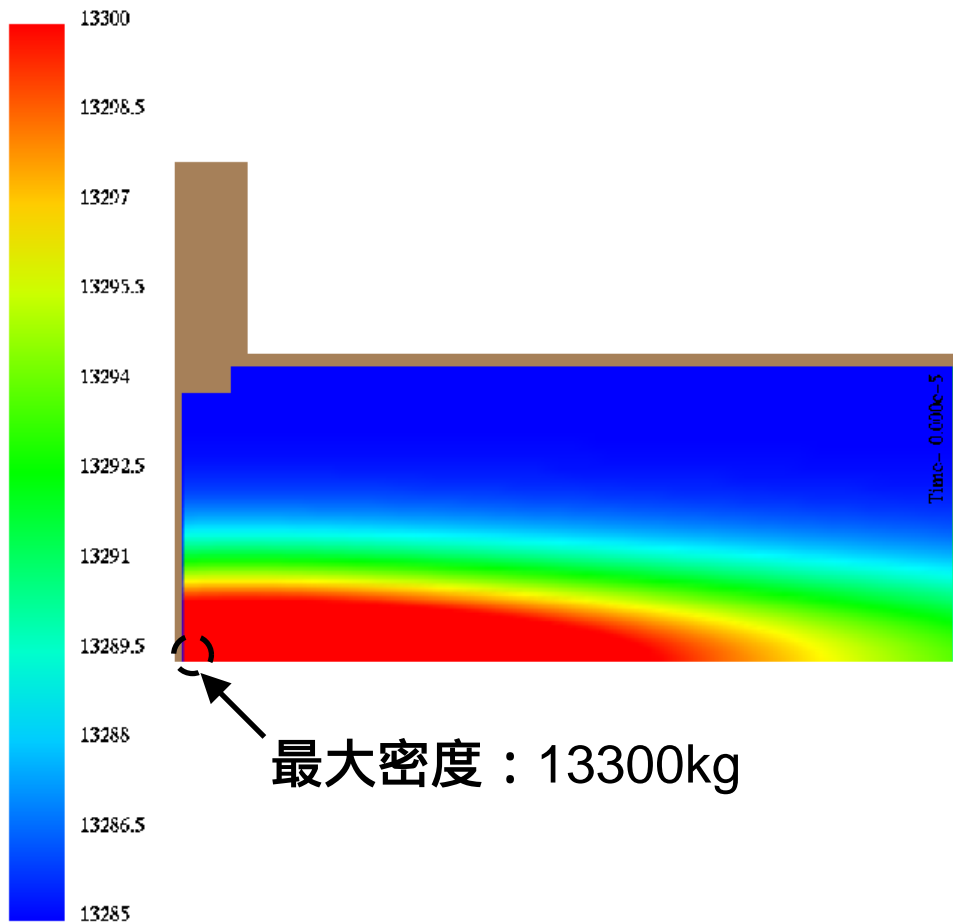
水銀は弾性体ソリッド要素を用いて模擬弾性体としてモデル化した。すなわち、弾性体の物性値としてせん断剛性がほぼゼロとなり、かつ水銀の体積弾性率と等価になるようにヤング率とポアソン比を設定した。ここで、波動伝播は断熱過程であるとし、水銀の体積弾性率は断熱体積弾性率とした。

物性値

| | 容器 | 水銀 |
|------------------------|-------|--------|
| 密度(kg/m ³) | 7890 | 13285 |
| ヤング率(GPa) | 188 | 0.0153 |
| ポアソン比 | 0.303 | 0.4999 |
| 体積弾性率(GPa) | — | 25.2 |

初期条件

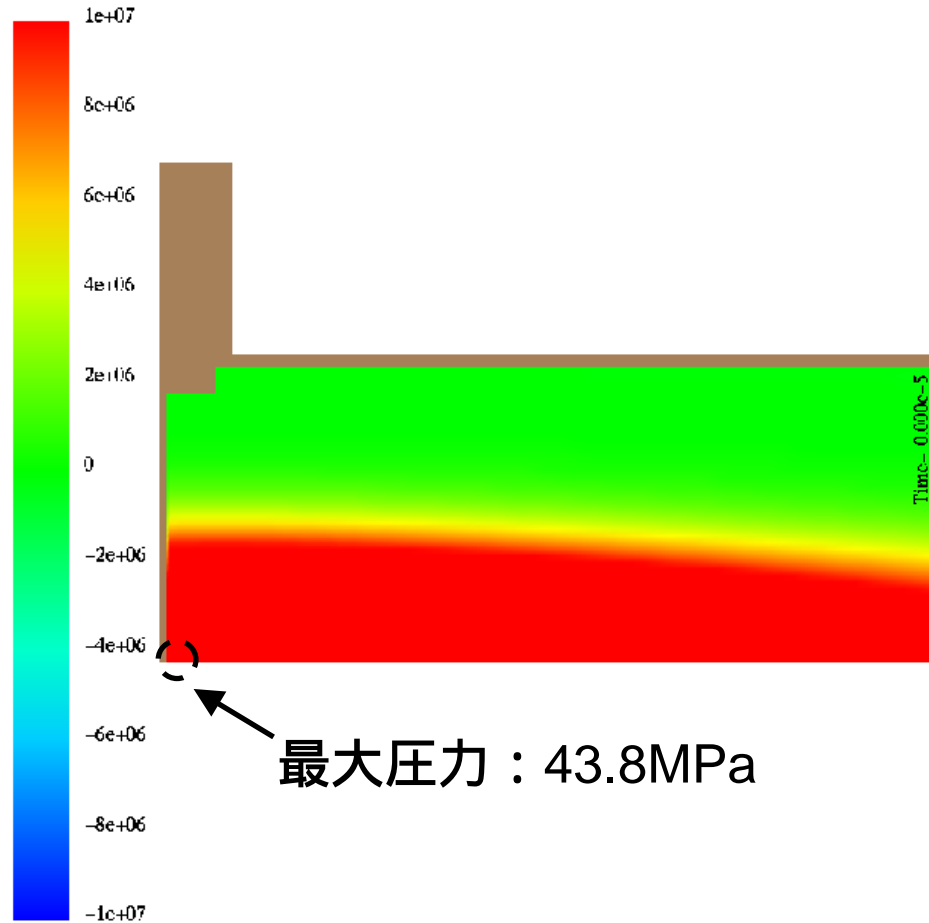
(kg)



最大密度：13300kg

密度分布

(Pa)



最大压力：43.8MPa

压力分布

水銀の圧力分布

(Pa)

1.E7

8.E6

6.E6

4.E6

2.E6

0

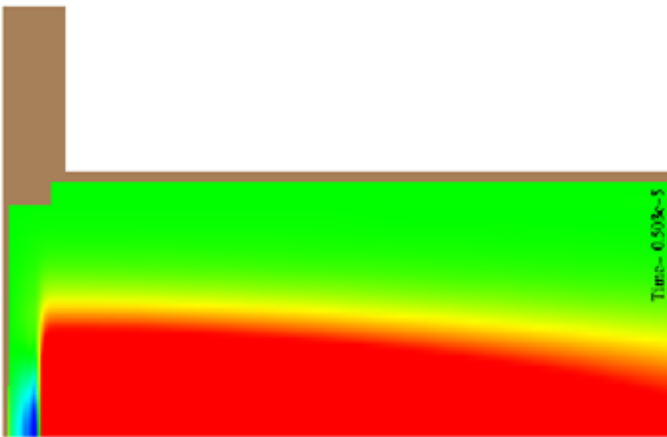
-2.E6

-4.E6

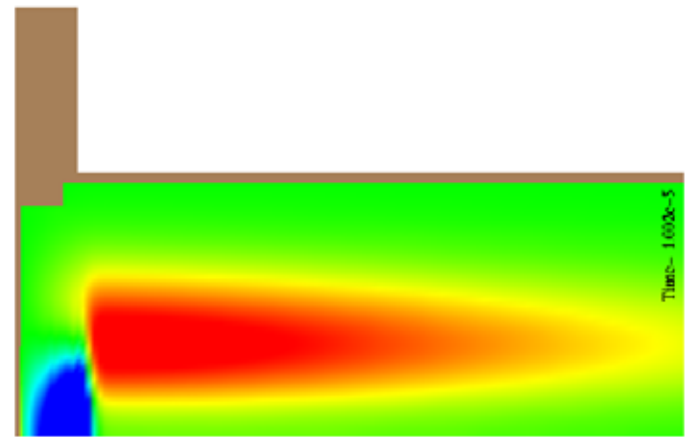
-6.E6

-8.E6

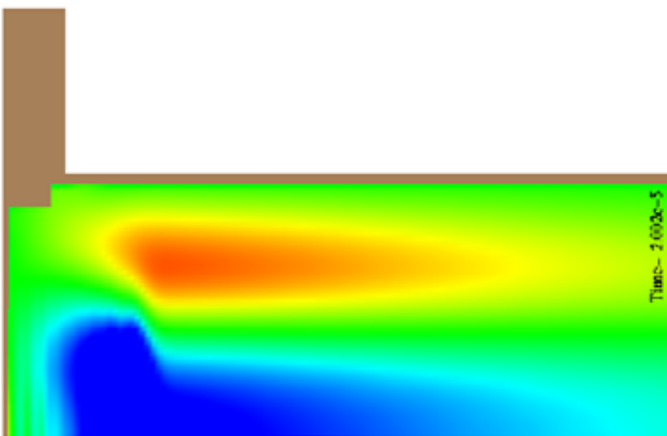
-1.E7



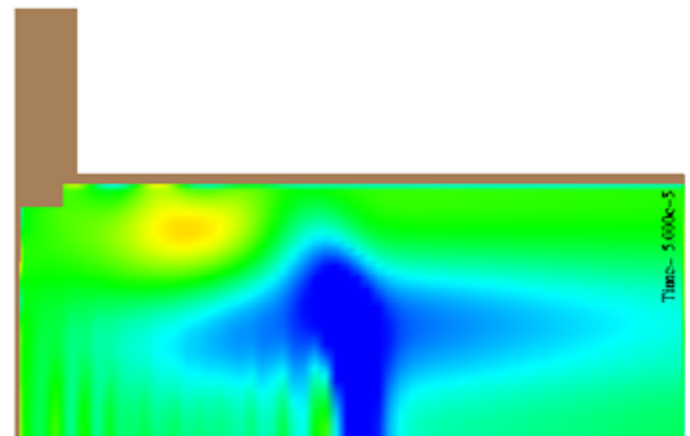
5 μs



10 μs



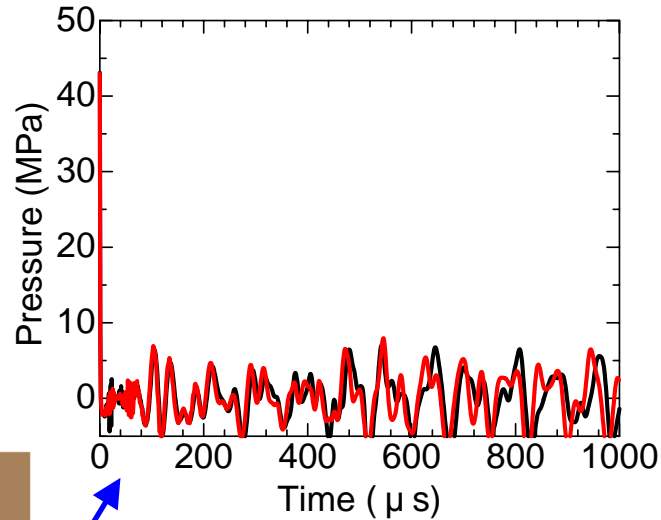
20 μs



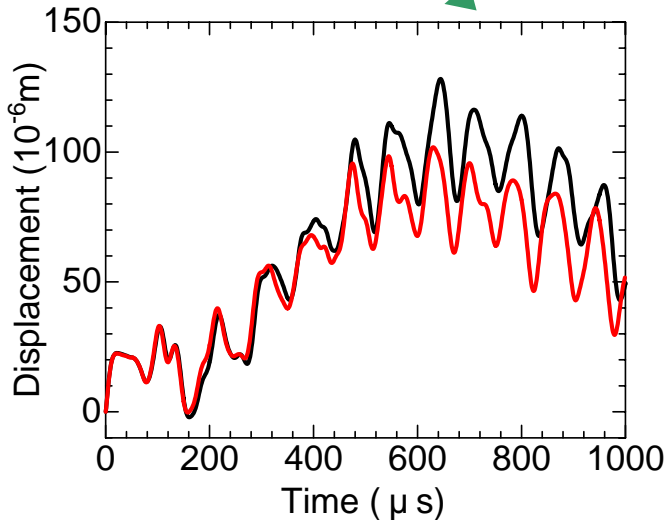
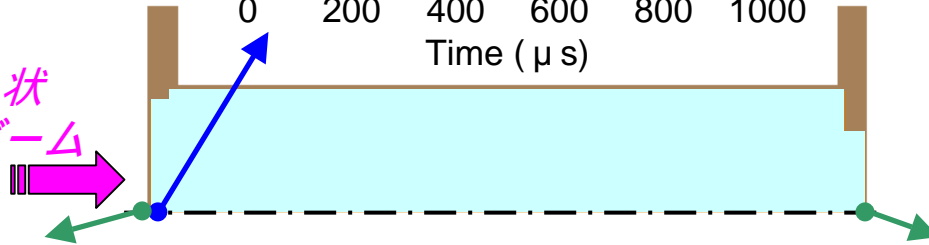
50 μs

LS-DYNAとの比較

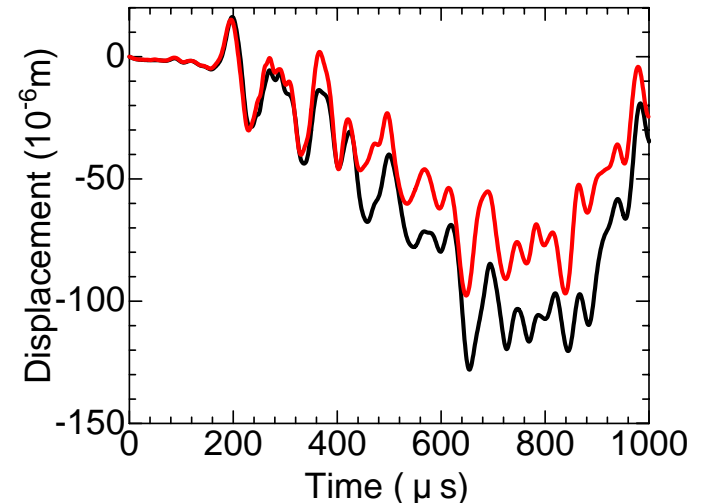
前部中心での
水銀の圧力履歴



パルス状
陽子ビーム



前部中心での容器の変位履歴



後部中心での容器の変位履歴

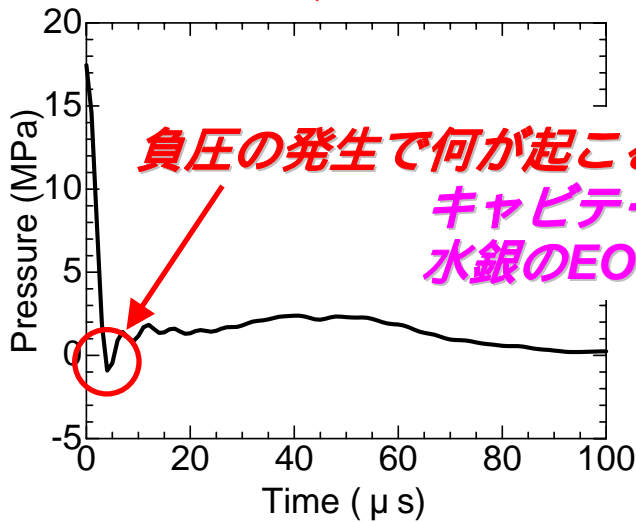
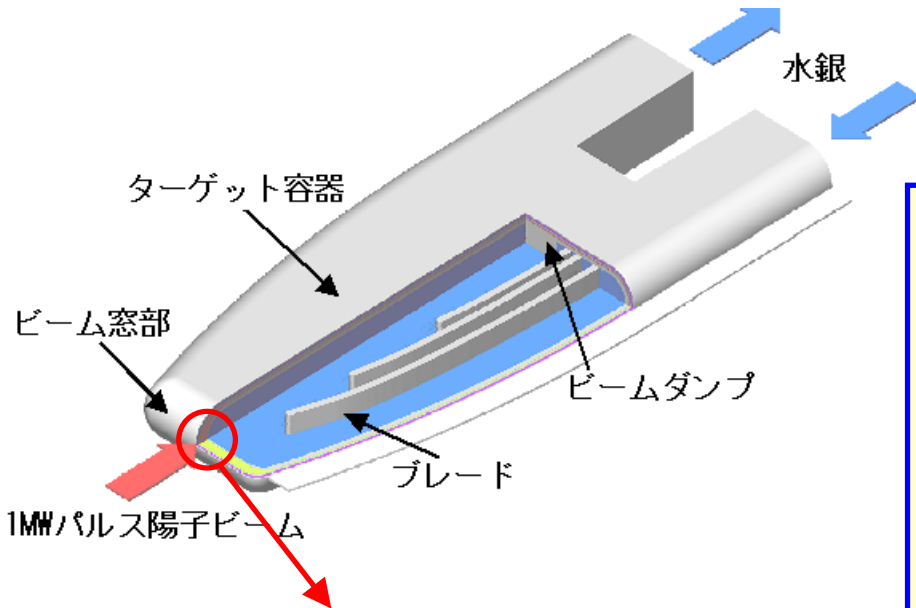
まとめ

米国のオークリッジ国立研究所が陽子加速器を用いて行った模擬水銀ターゲットモデルの動的熱衝撃応答に対して、RADIOSS-CRASHとLS-DYNAを用いた解析を実施した。その結果、水銀の圧力履歴、容器の変位履歴には大きな違いは認められなかった。

今後の予定

今回紹介した解析対象をRADIOSS-CFDを用いて解析する準備を行っており、その結果とLS-DYNAおよびRADIOSS-CRASHによる解析結果を比較しRADIOSS-CFDの優位性を確認する予定である。その後、RADIOSS-CFDにより水銀ターゲットの圧力波解析を実施する予定である。

水銀ターゲット開発における課題



負圧の発生で何が起こるか？

キャビテーション？
水銀のEOSの変化？

LS-DYNAによる圧力履歴
(窓部近傍)

これまで行ってきた水銀ターゲットの圧力波解析から、窓部近傍で水銀中に数MPaの負圧場を生じることが予測されている。この負圧により、キャビテーションの発生が予想され、水銀中での圧力伝播に影響を及ぼす可能性がある。さらに、キャビテーションが容器壁近傍で発生した場合、エロージョンによる壁面損傷が懸念される。このような水銀中で発生した圧力波によるキャビテーション損傷は、米国で行われた実験において実際に観察されており、水銀ターゲット容器の構造健全性を評価する上で重要となっている。