



- 世界最高性能の中性子源の実現！ -

J-PARCにおける水銀ターゲット容器 の損傷抑制技術の開発

J-PARCセンター
物質・生命科学ディビジョン
中性子源セクション
粉川 広行



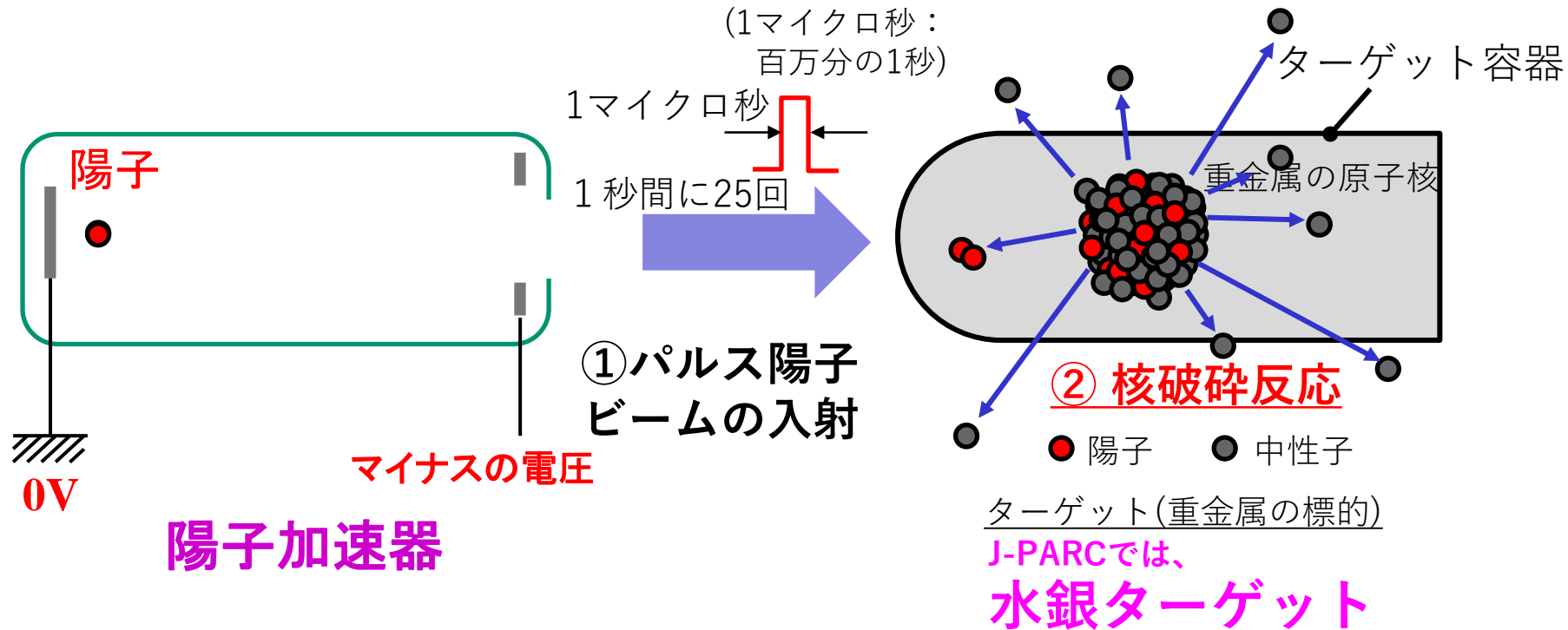
Japan Proton Accelerator Research Complex

原子力発祥の地、東海村に南北1キロに渡る敷地に建設された

3種類の加速器施設と3つの実験施設群からなる研究施設



物質・生命科学実験施設(MLF)では、
加速したパルス陽子ビームを重金属(ターゲット)にぶつけて中性子を発生



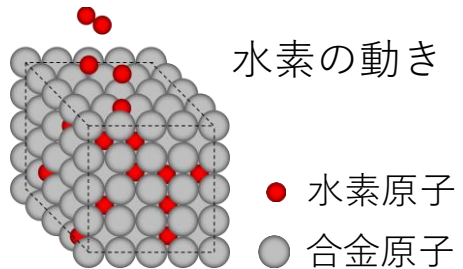
- より大量の陽子を入射させれば、より多くの中性子が発生
- 中性子を用いて様々な物質科学・生命科学に関する研究を展開

中性子の特徴

- 透過力が強い
- 波の性質
 - 原子の並び方を見る
 - 原子の運動を見る
- 軽原子（水素、リチウム）に敏感
- 磁石の性質

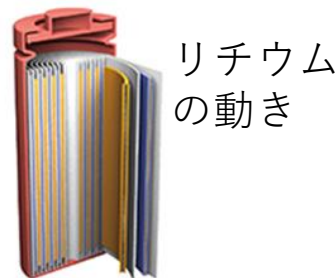
中性子を用いた研究例

水素吸蔵合金



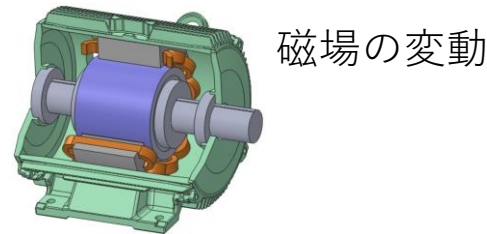
水素吸蔵量の増加
安価な吸蔵合金の開発

リチウム電池



高性能電池の開発

モーター



効率の上昇

高性能タイヤ



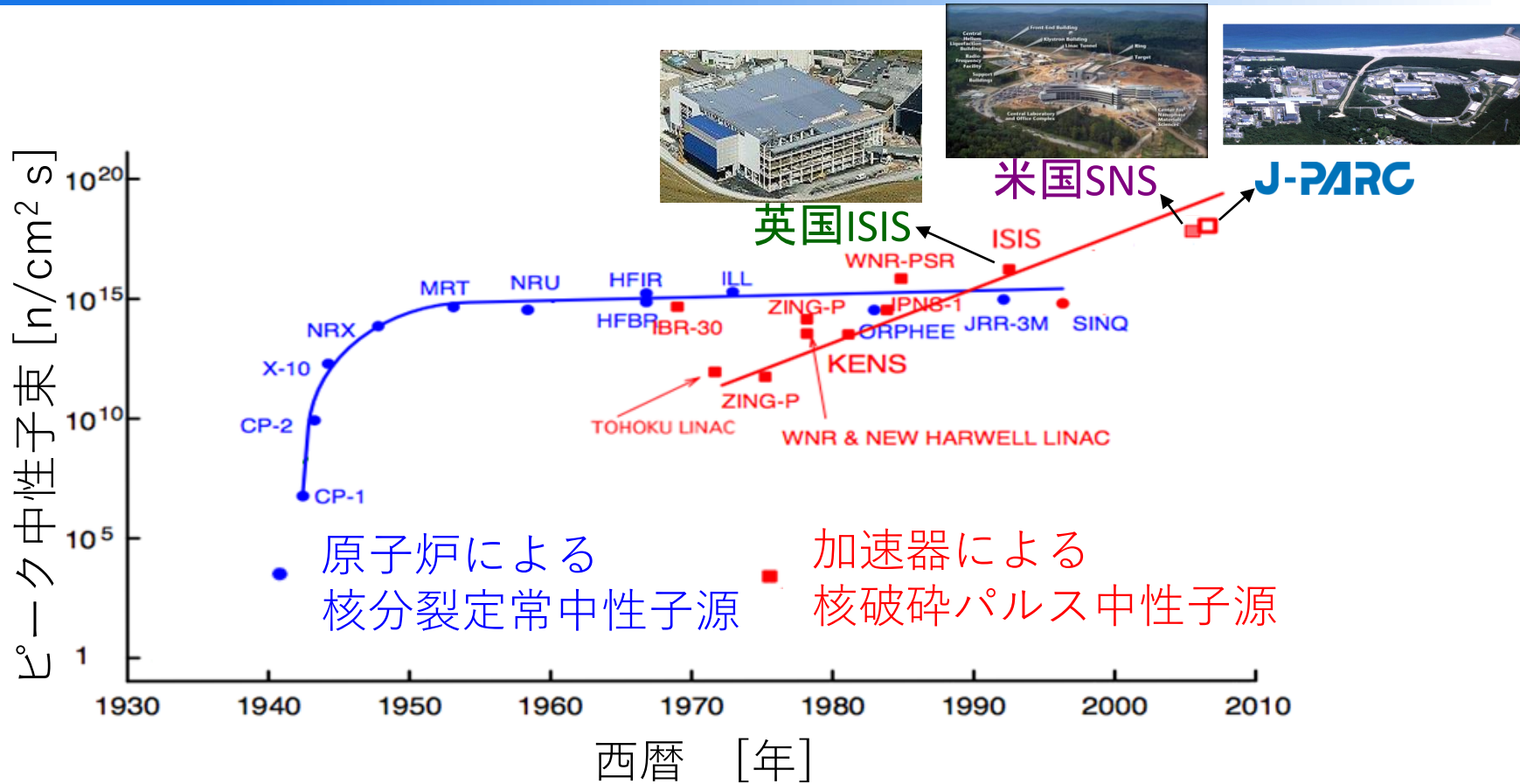
低燃費タイヤの開発
資料提供：住友ゴム工業(株)

中性子は

地球温暖化対策に不可欠な水素社会の実現や
カーボンニュートラル等に関する技術を創生する
強力な武器

もっと中性子を！

高出力・高性能の核破砕中性子源の要求



- 原子炉による核分裂中性子源の中性子束は頭打ち
- 加速器駆動核破砕中性子源の中性子束は加速器の性能向上とともに増加

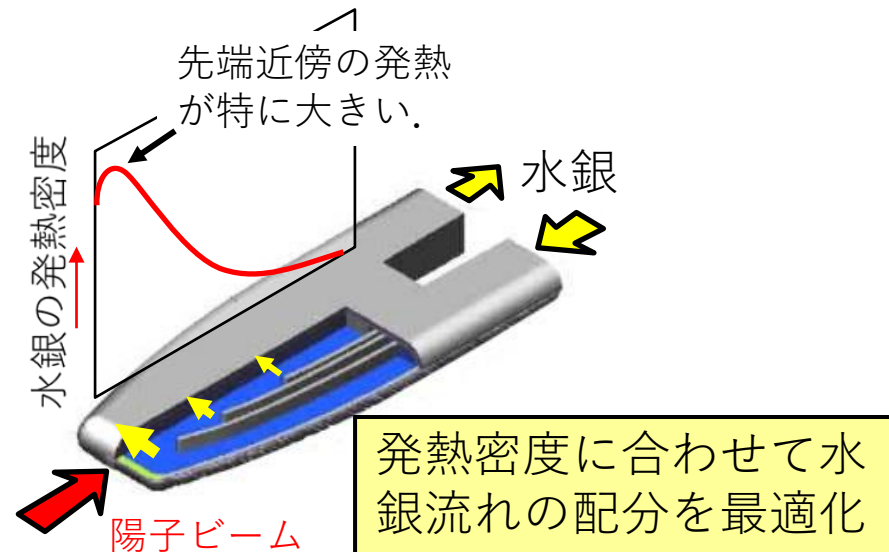
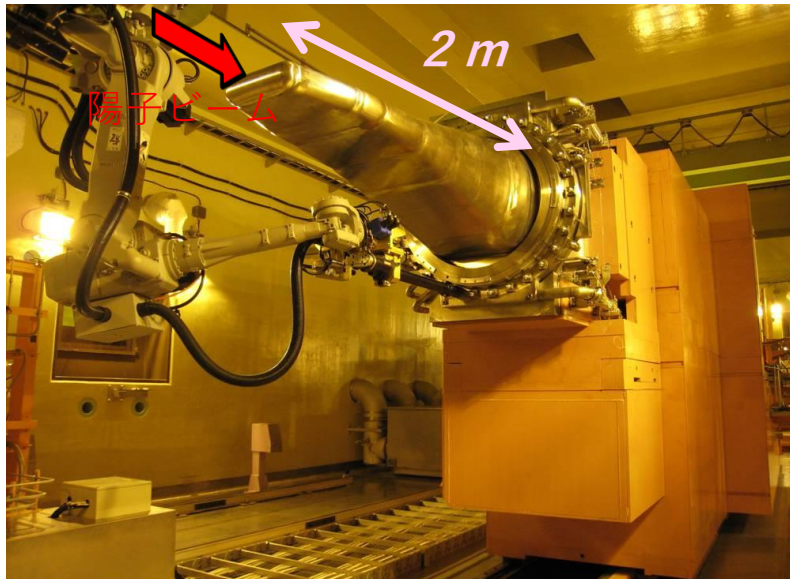
ターゲットの熱除去が課題 ⇒ SNS(米)、J-PARCは水銀ターゲット

水銀 は常温で液体の重金属

冷却材として機能

中性子発生効率

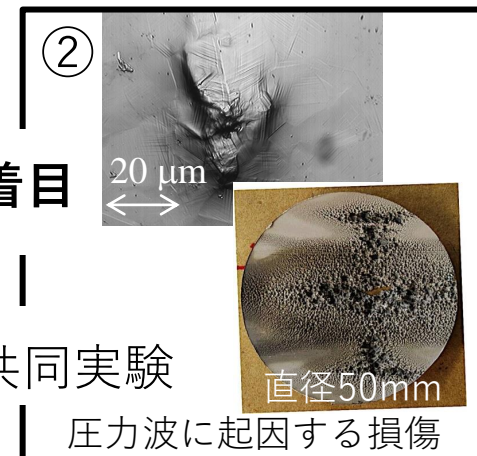
大強度の核破砕中性子源ターゲットの材料として好適



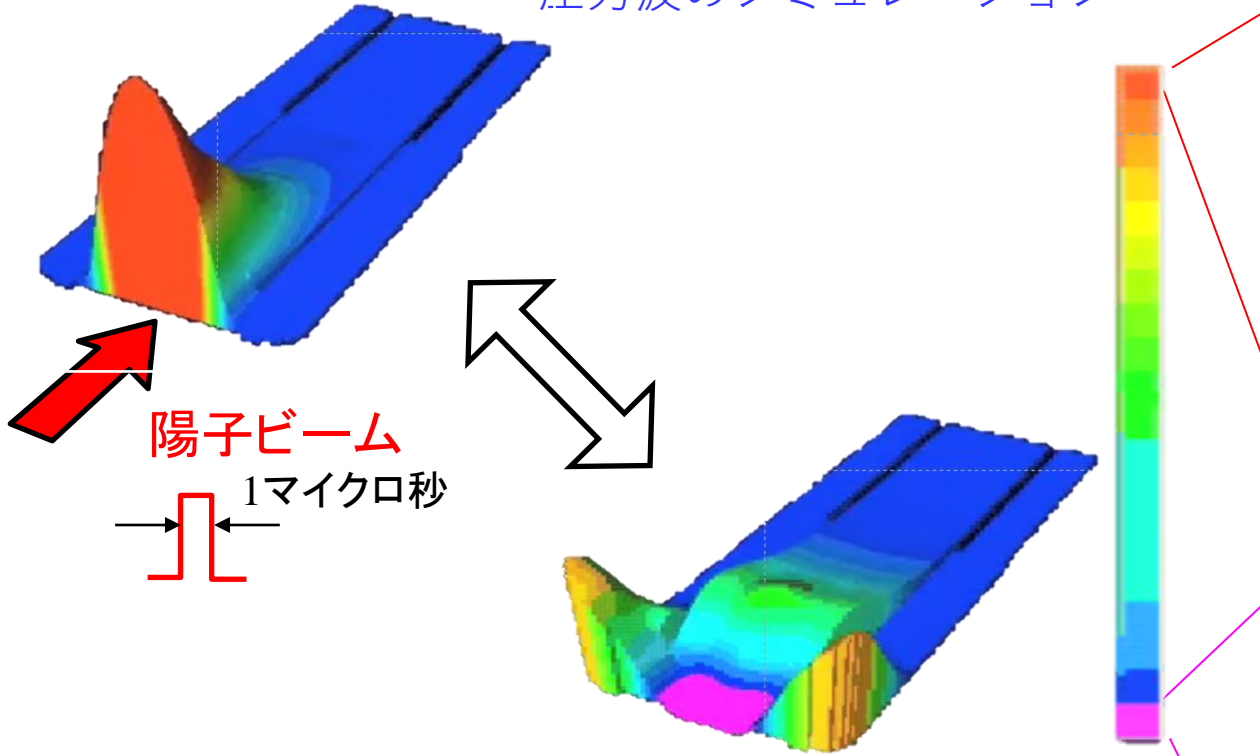
高出力陽子ビーム入射による圧力波(圧力の波)に起因する課題の克服

- 1997～陽子ビームを用いた**圧力波実験** (国際共同実験) ①
水銀の衝撃試験
- 2000 **圧力波に起因する損傷を発見** (原研) ②
- 2001 陽子ビームを用いた実験で損傷を確認 (米国ORNL)
- 2002 **損傷メカニズムを解明** (原研)
- 2004 **圧力波低減としてマイクロバブルのクッション効果に着目**
流動水銀中へのマイクロバブル注入技術の開発に着手
- 2008 J-PARC水銀ターゲットから中性子発生に成功
- 2011 陽子ビームを用いたマイクロバブル効果に関する国際共同実験
- 2012 **J-PARC マイクロバブル注入運転開始** ③
マイクロバブルのクッション効果の確認、損傷の観察
- 2018 **J-PARC 1 MW運転を達成**
世界を凌駕する最高性能のパルス中性子源の実現に成功

高出力・長期運転を達成するための耐久性向上に関する研究開発を継続



圧力波のシミュレーション



深さ4000mの
深海の圧力!

提供：海洋研究開発機構

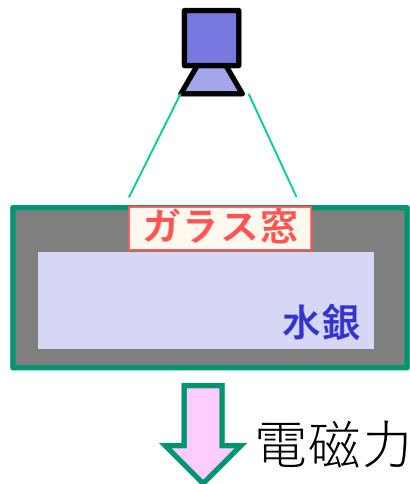
圧力低下 (真空)
高度400 kmの圧力

提供：宇宙航空研究開発機構

- 核破碎反応の発熱による水銀の瞬間的な熱膨張で**最大400気圧**の圧力
- 容器変形と圧力波伝播との相互作用で**圧力低下 (真空)**

水銀中の衝撃的な圧力低下

高速度
ビデオカメラ



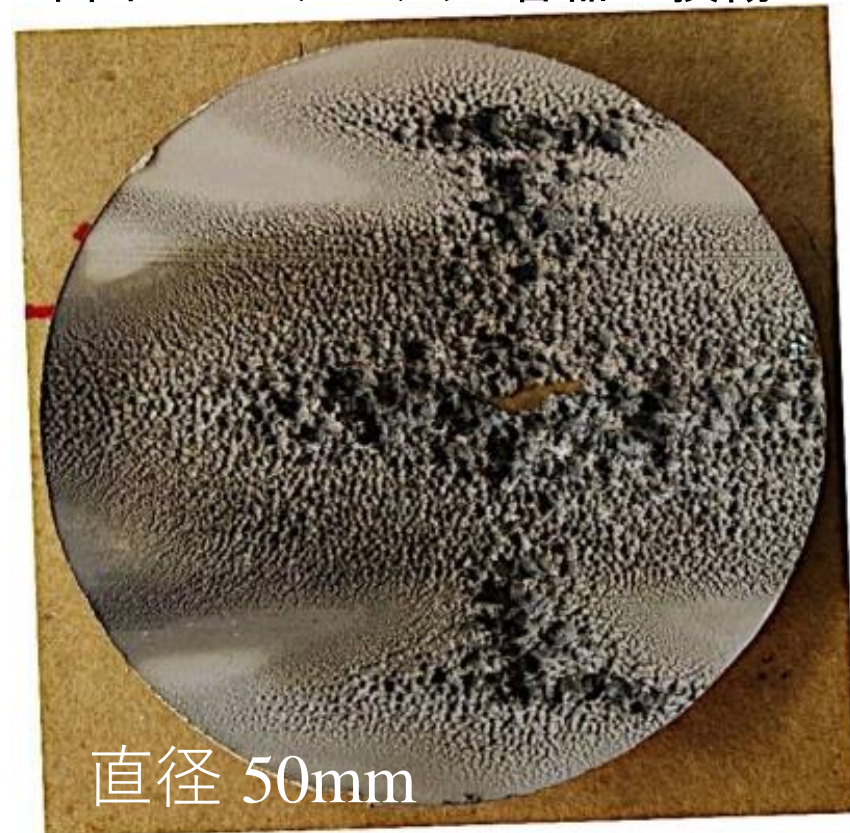
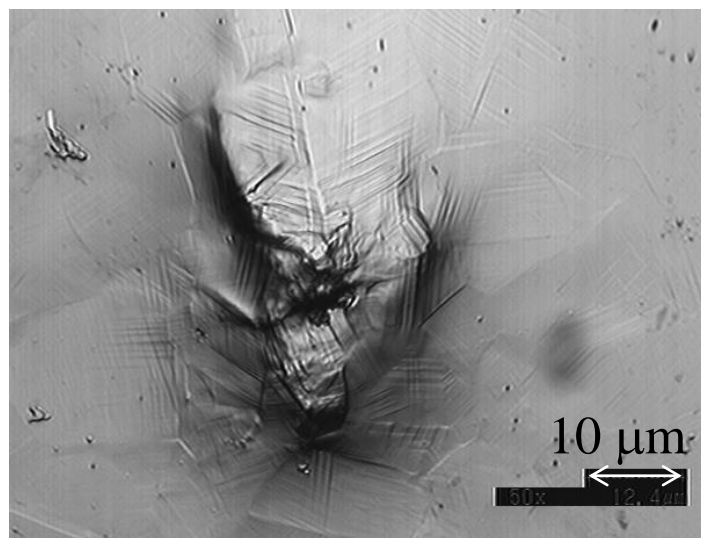
5 mm

水銀中で沸騰気泡が発生

➤ 沸騰気泡が消滅する際に大きな衝撃力

水銀中に衝撃的な圧力低下を繰り返し負荷

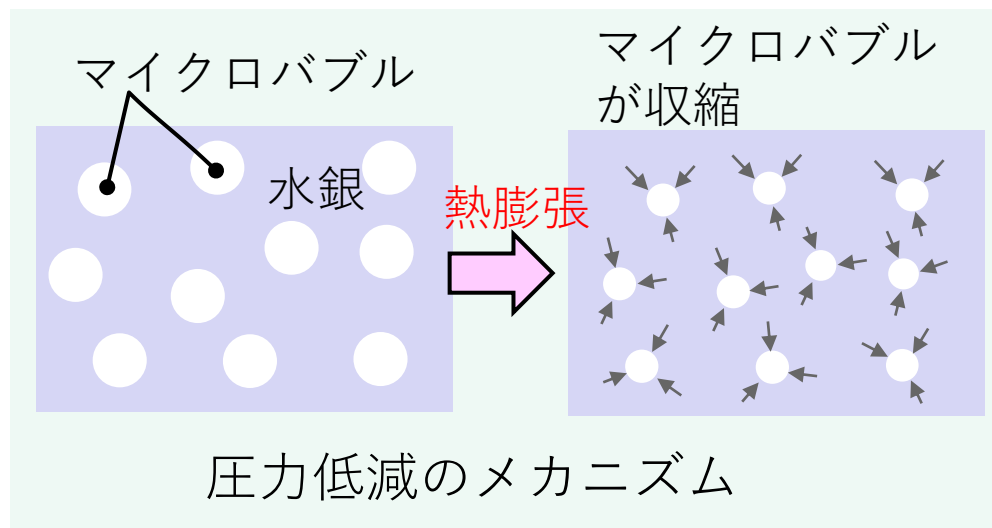
米国SNSのターゲット容器の損傷



- 繰り返し圧力低下で損傷が進行
- 容器が貫通

損傷を抑制するためのクッション効果とは

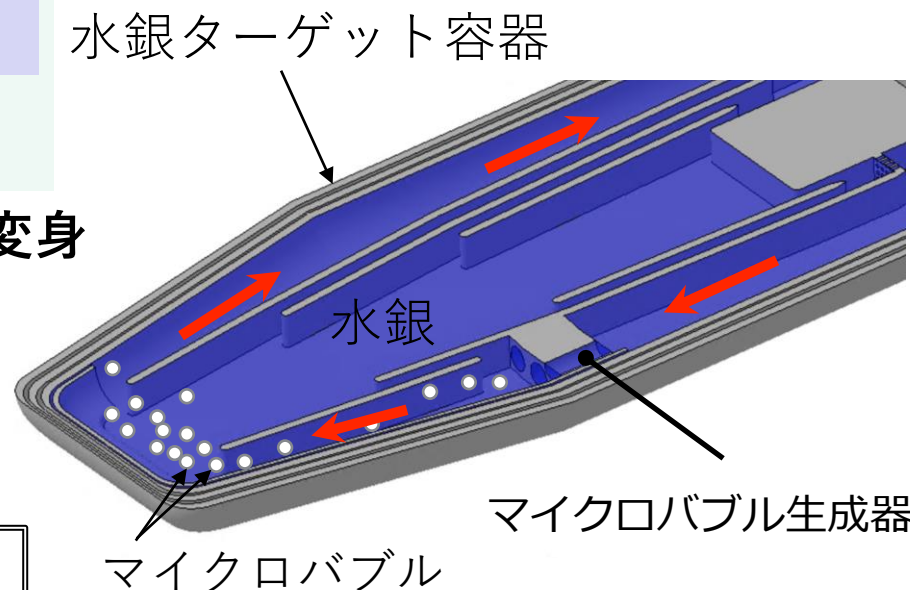
水銀の急激な熱膨張をヘリウムガスの**マイクロバブル**でクッションのように受け止める。



衝撃を受け止められるやわらかい水銀へ変身

⇒ 圧力波を低減

⇒ 沸騰気泡の発生を抑制



国際関連研究所と国内大学と協力して
注入マイクロバブルの最適条件を明確化

流体の特性が水とは著しく異なる水銀に マイクロバブルを生成するには

霞ヶ浦の水質浄化に開発された気泡生成メカニズムに着眼し、**水銀中**で目標とするサイズのマイクロバブルを大量に生成可能な**マイクロバブル生成器**を開発。

細いノズルからの気泡生成



水

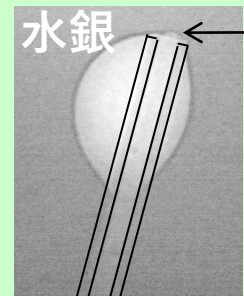
ノズルの先端

ノズル

外径：200 μm

内径：100 μm

(μm : 千分の1 mm)



水銀

ノズルの先端

X線可視化による
水銀中での気泡生成

ノズル(金属)の外側に
ガスが付着

流体の特性の違い

⇒ 水銀中で細いノズルからの
マイクロバブル生成が困難

水質浄化用気泡生成器

出口

液体の入口

固定羽根

出口

入口

固定羽根(水銀旋回流発生部)

気泡生成の様子

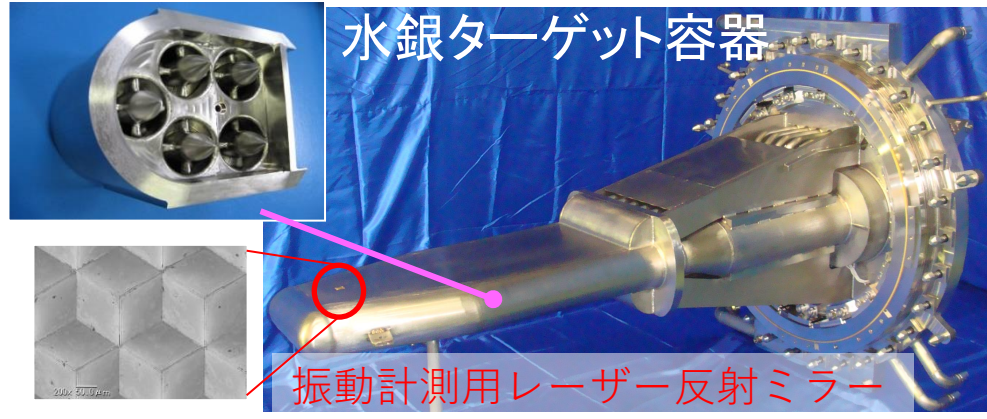


50 mm

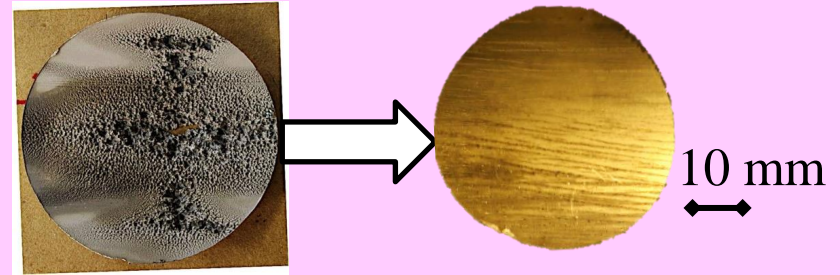
水銀ターゲット用の
マイクロバブル生成器
を開発

SNS(米)でも
採用予定

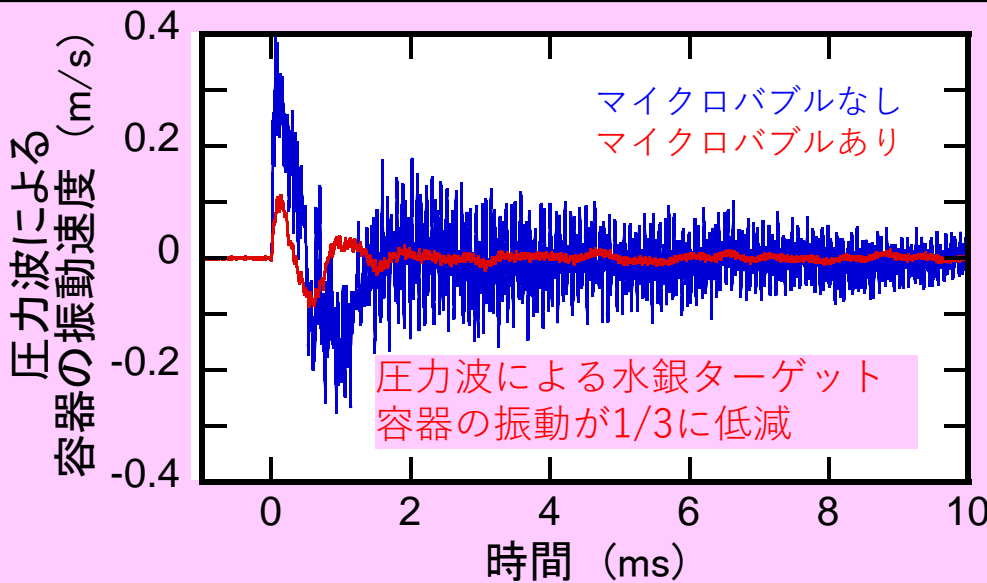
水銀ターゲット容器



水銀ターゲット容器先端を切出して損傷の抑制を観察



容器を貫通(SNS) 損傷を抑制(J-PARC)



◆ J-PARCの実機運転で高い圧力波の低減効果を実証

損傷を観察しながら、段階的に陽子ビームの出力を上昇

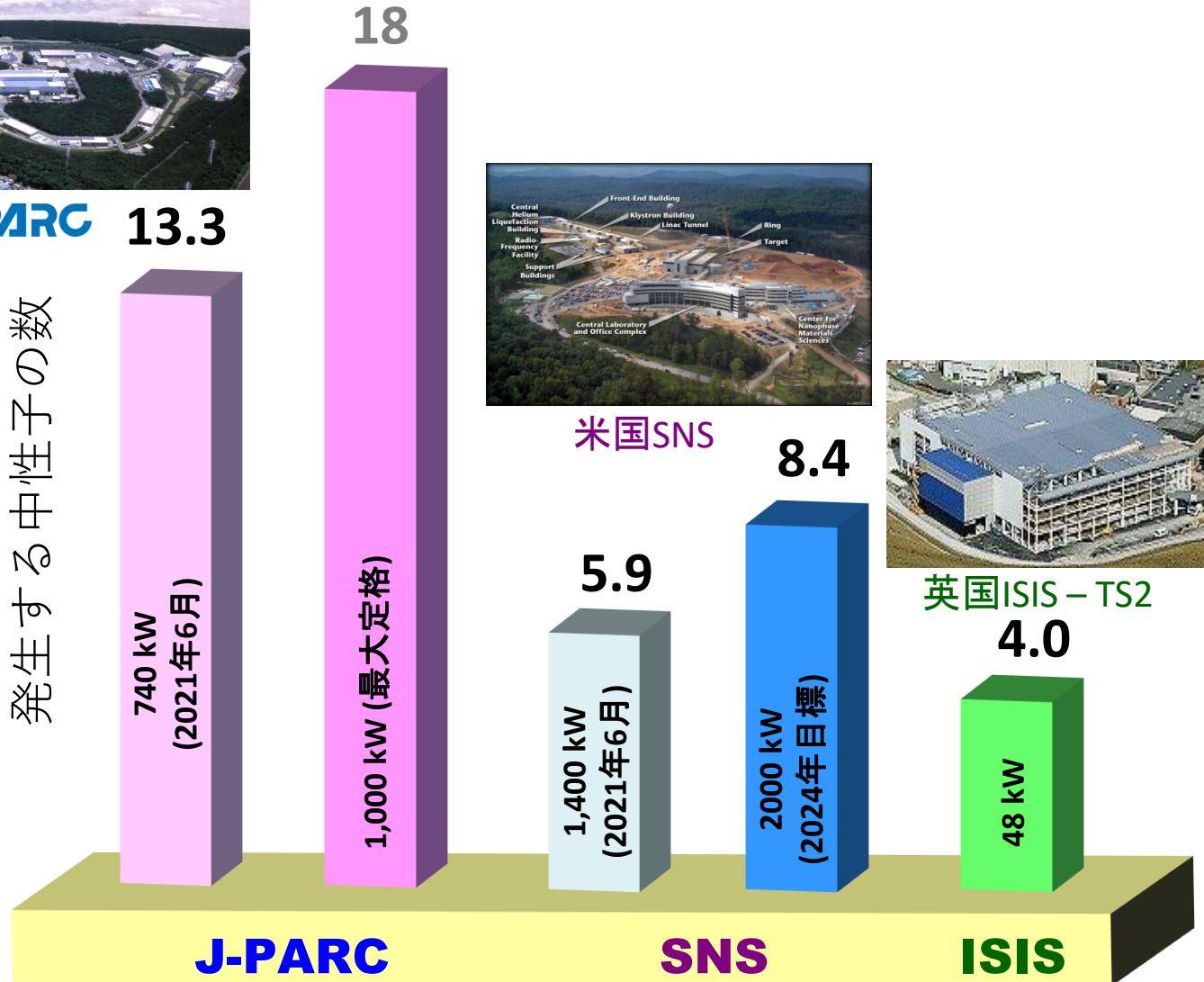
1 MW
安定連続運転





J-PARC 13.3

陽子ビーム一発で発生する中性子の数



米国SNS



英国ISIS - TS2

より短時間に
より多くのデータを
取得可能に！

単位: 10^{12} n/(sr·pulse)

- **中性子科学**は、地球温暖化対策に不可欠な**水素社会**の実現や**カーボンニュートラル**等に関する技術を創生する強力な武器です。
- **世界最高パルス中性子束**を生成する**水銀ターゲット**をJ-PARCに実現できました。
 - そこには、**陽子ビーム入射**で励起する**圧力波**による損傷が最大の難敵でした。
 - **マイクロバブル**を注入することで圧力波の抑制、損傷の低減が可能となりました。
- 水銀ターゲット容器の**耐久性**や**信頼性**を向上するために、更なる損傷の低減や異常診断技術に関する研究・開発を進めていきます。