



1. 研究背景と研究目的

過酷事故 (SA) 時における原子炉内容融物の移行挙動の解明は、事故時の炉内状況把握および廃炉作業の効率化の観点から非常に重要である。しかしながら、既存のSA解析コードは事前進展シナリオが予め与えられているなど多くの不確かさが含まれており、複雑な構造物で構成される原子炉内での現象把握が困難である。その課題に対して日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、多相多成分熱流動解析コードJUPITERの開発を進めている。JUPITERは多種金属および炉内構造物を含んだ溶融物解析が可能であり、炉内簡略模擬体系においてSAを模擬した原子炉圧力容器および下部ペDESTALにおける溶融物の移行挙動解析が行われてきた (図1)。また、計算の高速化として、CPU向けの省通信型マルチグリッド (MG) 法の開発によりOakforest-PACSにおいて、計算性能の向上に成功している (図2)。本課題では、更なる高速化として圧力Poisson方程式のGPU実装および適合細分化格子 (AMR) 法の導入することで、JUPITERコードの解析範囲が拡張され、事故時の炉内状況把握およびSA解析の高度化に大きく貢献できる。

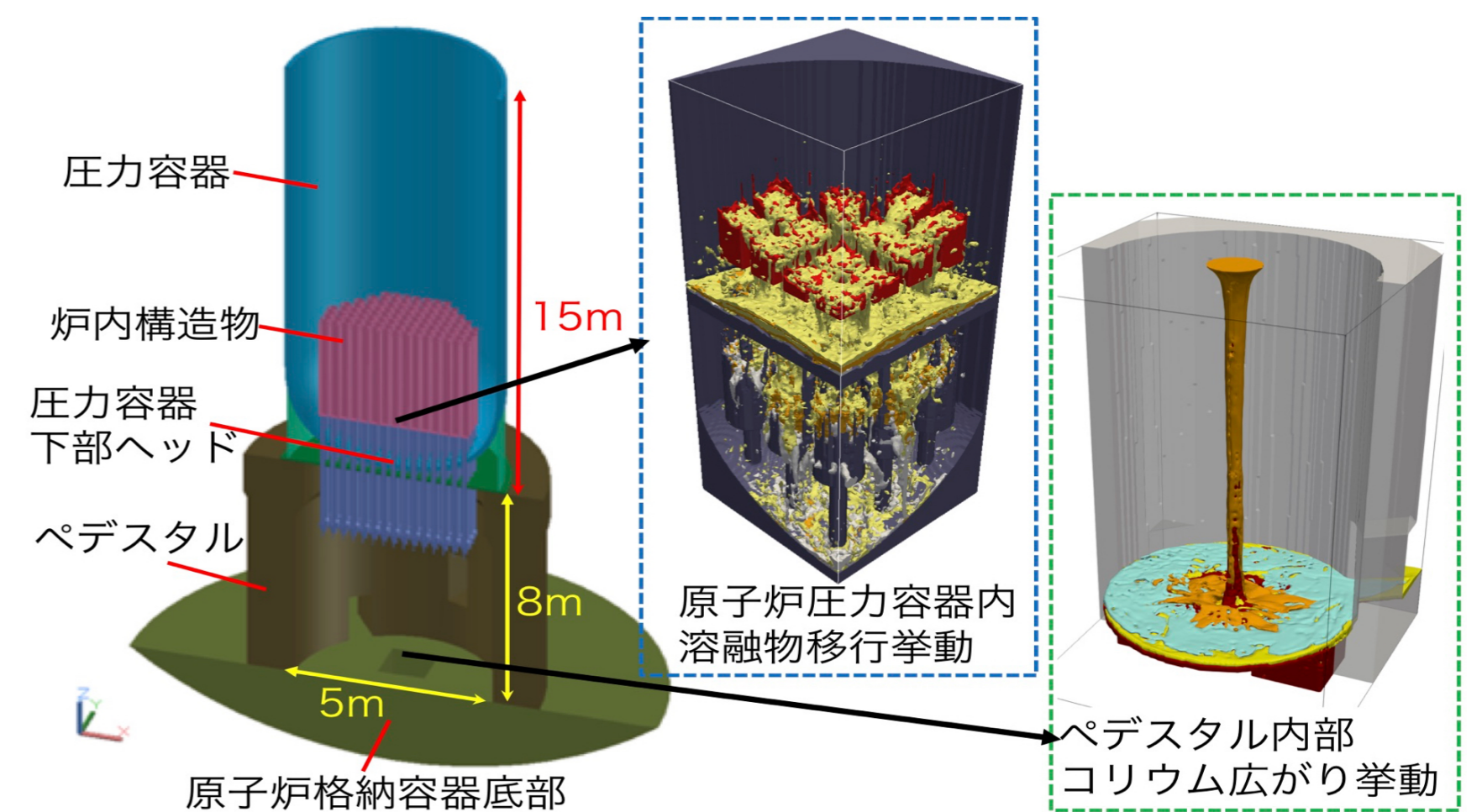


図1 JUPITERコードによる上部の圧力容器内、下部ペDESTAL内の溶融物移行挙動解析

2. 共同研究に関する情報

- (1)共同研究拠点：東京工業大学 (TSUBAME3.0)
- (2)共同研究分野：超大規模数値計算系応用分野
- (3)研究グループ：代表者 小野寺 直幸 (日本原子力研究開発機構)
副代表者 青木 尊之 (東京工業大学)
課題参加者 井戸村 泰宏 (日本原子力研究開発機構)
課題参加者 山下 晋 (日本原子力研究開発機構)
課題参加者 山田 進 (日本原子力研究開発機構)
課題参加者 真弓 明恵 (日本原子力研究開発機構)
課題参加者 下川辺 隆史 (東京大学)

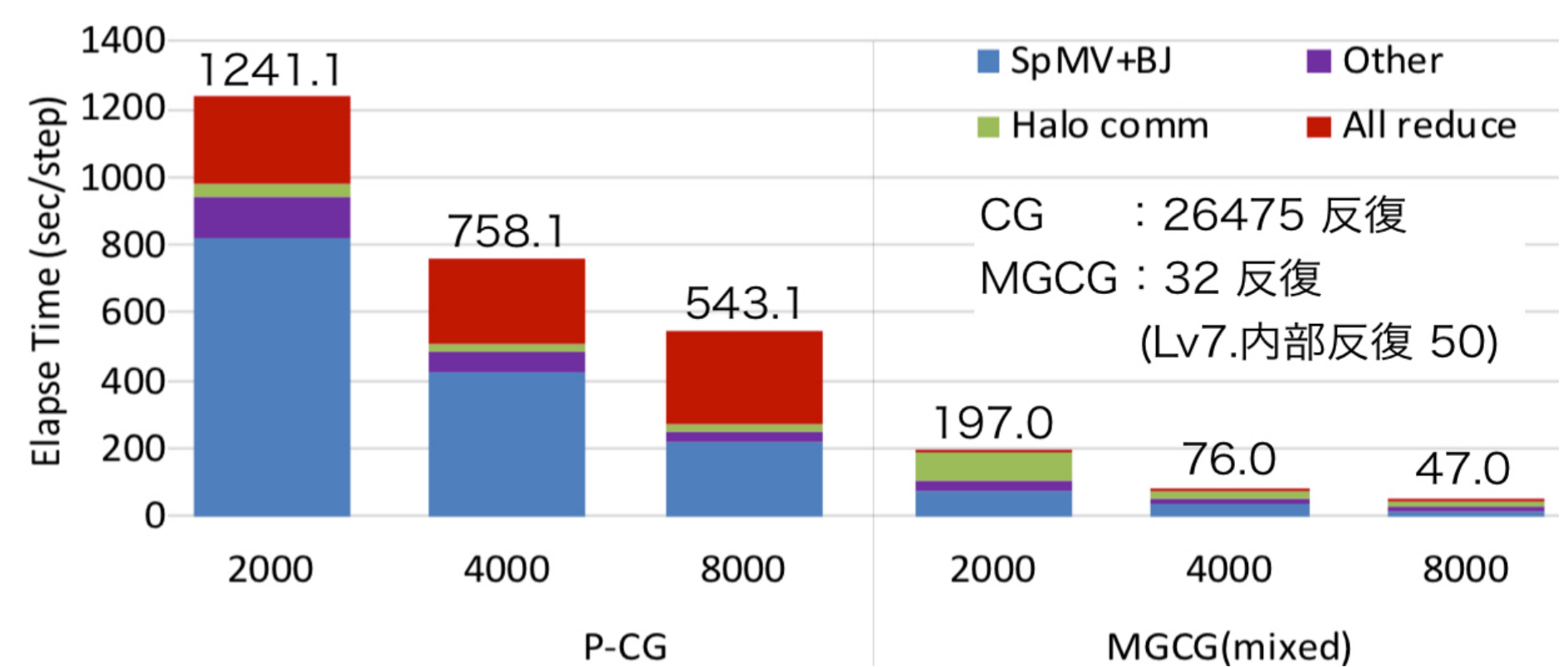


図2 溶融物移行挙動解析の圧力方程式に対するP-CG法および省通信マルチグリッドCG法(倍精度/単精度の混合精度)による強スケーリング (Oakforest-PACS: 2000,4000, 8000台、格子点数 3,200x2,000x14,160)

3. 研究計画と進捗状況

GPUスーパーコンピュータを活用したJUPITERの更なる高速化に向けて以下の項目の実施を計画している。

- 1. JUPITERコードの計算カーネルのGPU実装
- 2. 圧力Poisson方程式に対する反復解法の最適化
- 3. ブロック型適合細分化格子 (AMR) 法の導入
- 4. 炉内構造物の簡略模擬体系に対する大規模計算の実施

3.1. 進捗状況

図3にJUPITERコードの計算カーネルのGPU実装でのPoisson方程式のBlock-Jacobi前処理での領域分割および計算時間を示す。コア数が非常に多いGPUでの計算に適した部分領域分割およびスレッド配置により、CPUと比較して5倍程度の高速化が達成されている。

図4に省通信CG法¹を用いたPoisson方程式に対する強スケーリング性能測定の結果を示す。GPUに対応した計算カーネルを実装する事で、JAEAの大型計算機ICE-Xでの計算と比較して、5倍程度の高速化が達成された。また、省通信CG法 (CA) の適用により、128並列および256並列の計算において、計算時間が短縮された。

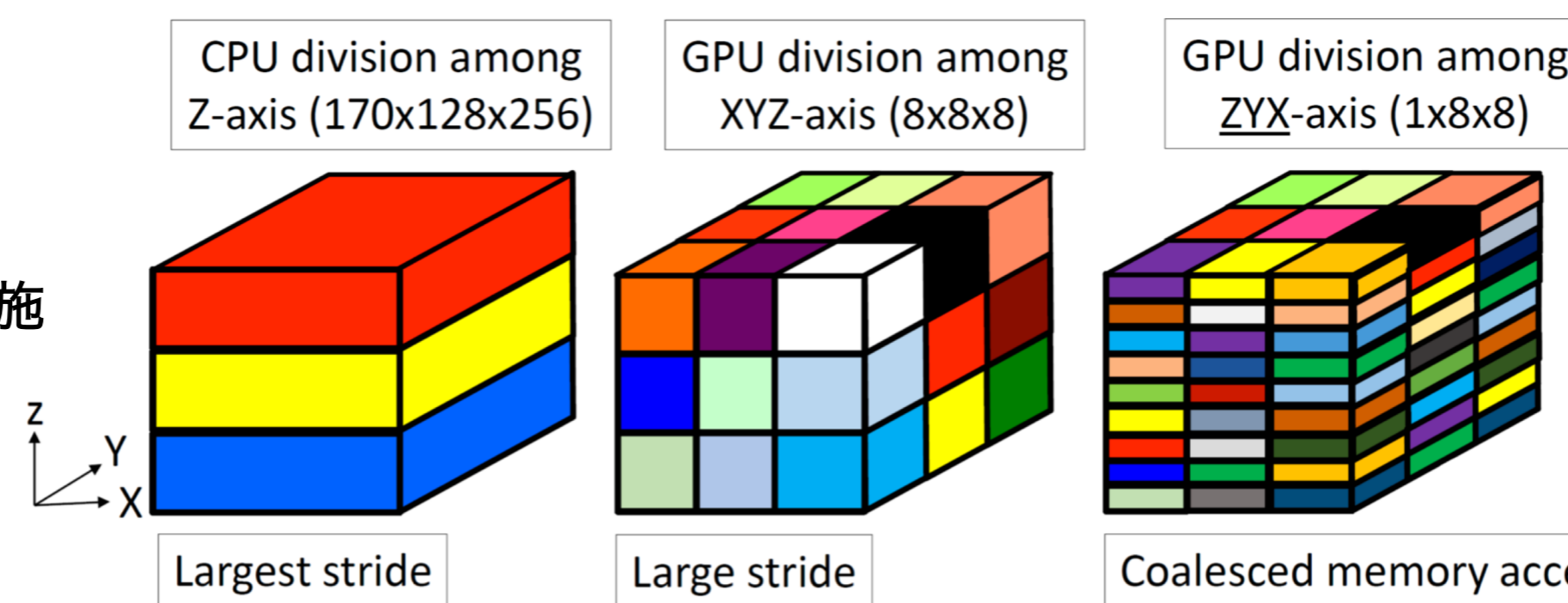


図3 Poisson方程式のBlock-Jacobi前処理での部分領域分割。CPUでの領域分割と比較して、コア数が非常に多いGPUでは、細かい領域分割が必要となる。反復回数と計算時間のトレードオフにより最適な分割サイズを決定している。

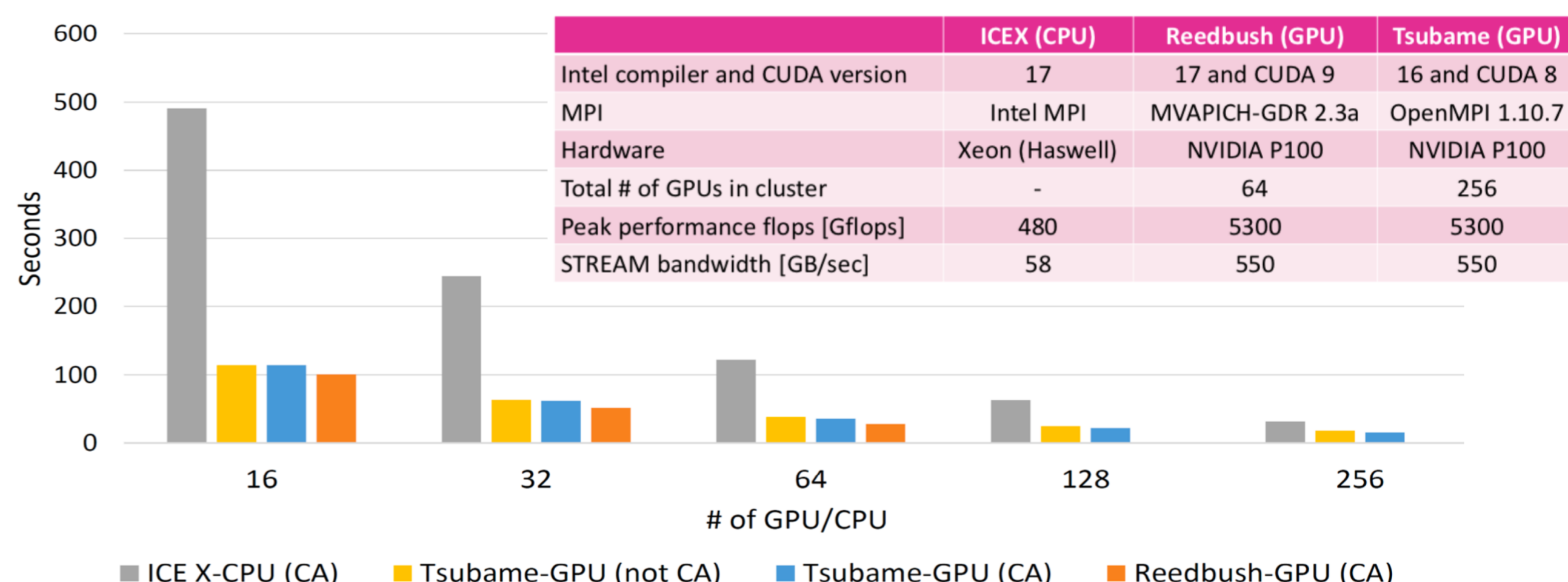


図4 CPUおよびGPUでの省通信CG法¹の強スケーリング性能測定結果。

¹Porting a state-of-the-art communication avoiding Krylov subspace solver on P100 GPUs, Yussuf Ali, Ina Takuya, Onodera Naoyuki, Idomura Yasuhiro, GTC Japan 2018, Sep. 2018

4. 今後の実施計画

JUPITERにAMR法を導入する事で、複雑な構造物を含む解析の省メモリ・省計算コストを実現し、SA解析の高速化を達成する。さらに、ブロック型AMR法のデータ構造に対応したPoisson方程式の前処理手法 (マルチグリッド法) の開発により、炉内構造物の簡略模擬体系に対する大規模計算の実現を目指す。