ダイバータ関係サブクラスター合同会合、2013.8.29-30
つくばサイエンスインフォメーションセンター

不純物排気モデルの開発と SAダイバータシミュレーションへの適用

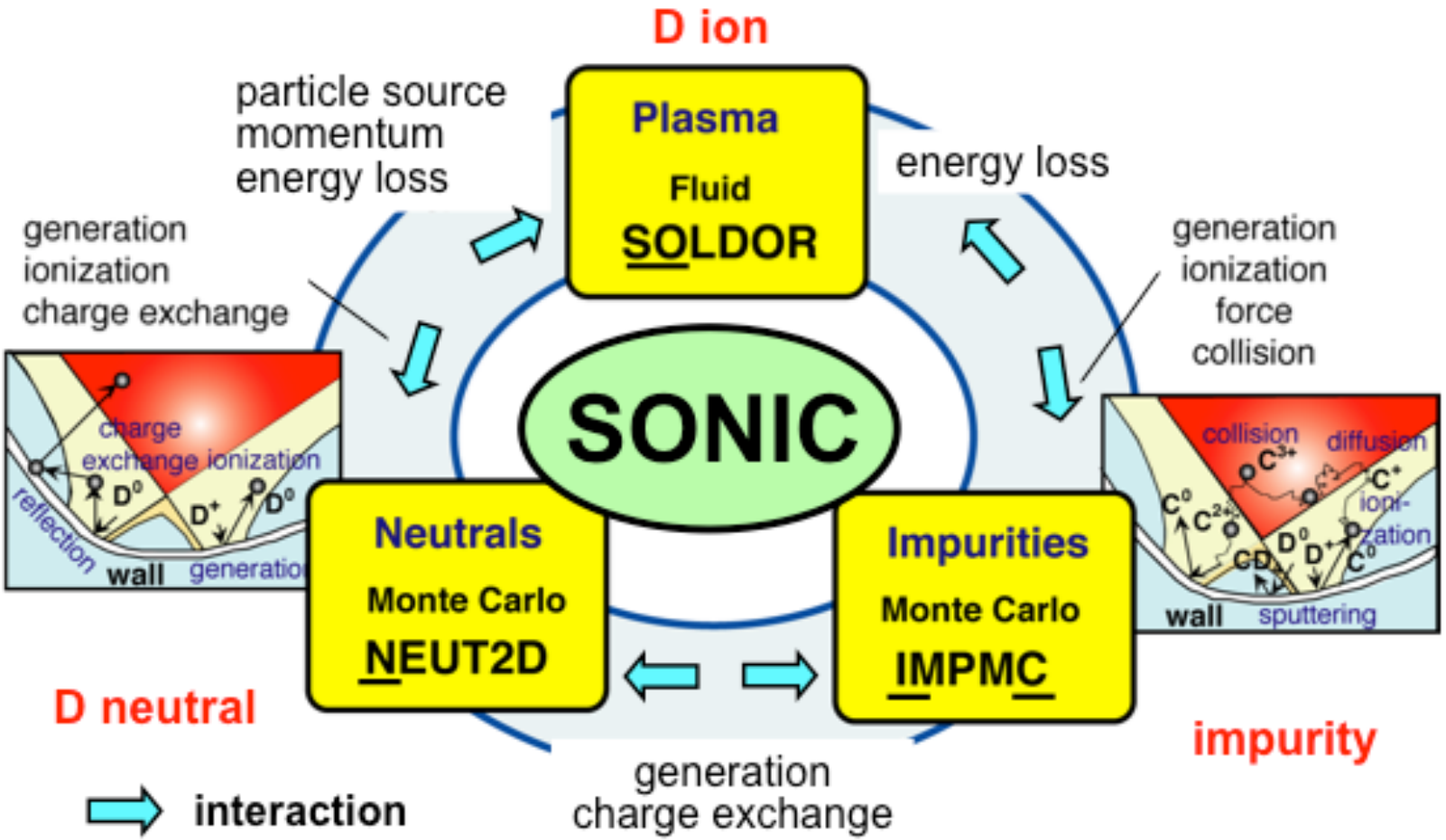
星野一生
清水勝宏、川島寿人、滝塚知典[1]、仲野友英、井手俊介

原子力機構、大阪大学[1]

バックフローを考慮した
不純物排気モデルの開発

統合ダイバータコード SONIC

原子力機構では、JT-60Uの実験解析、JT-60SA・原型炉の
ダイバータ設計研究を進めるためにSONICの開発を進めている



H. Kawashima, Plasma Fusion Res. 1(2006)031.
K. Shimizu, Nucl. Fusion 49(2009)065028.

統合コードにおけるモンテカルロ法の問題点

モンテカルロ法は不純物輸送のモデリングに柔軟性あり。ただし以下の問題点。

(1) slowing down timeによる時間ステップ幅の制限

⇨ Langevin の解析解を用いた拡散モデルを適用

(2) MC ノイズ

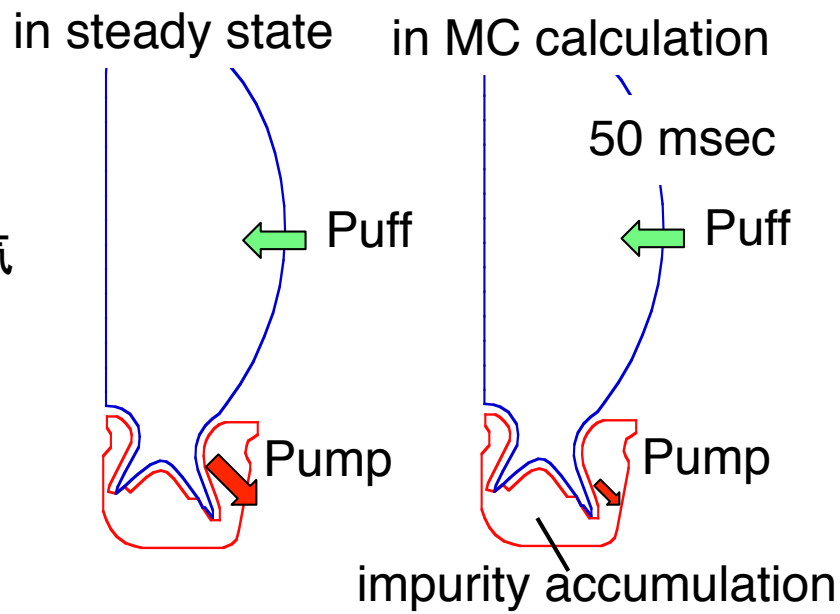
⇨ サンプル粒子数を大きく (typically 50000)
並列化による計算の高速化

さらに希ガス不純物を扱う場合

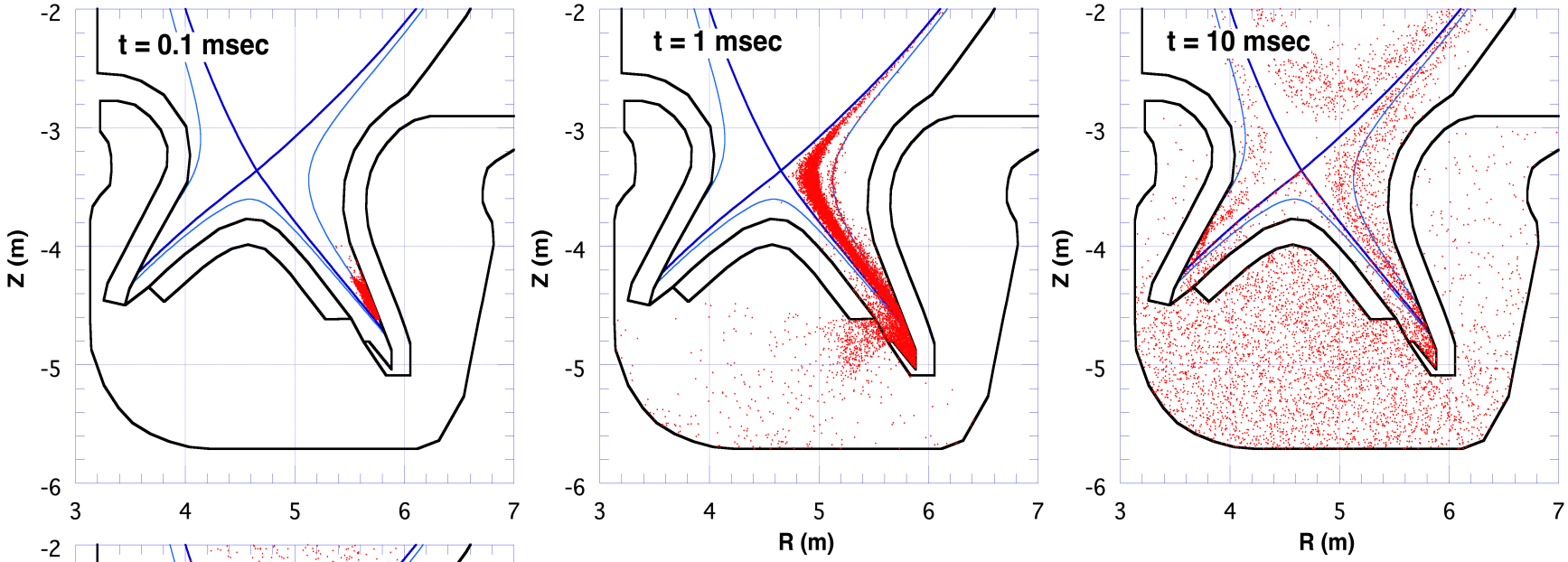
(3) 粒子の不滅性

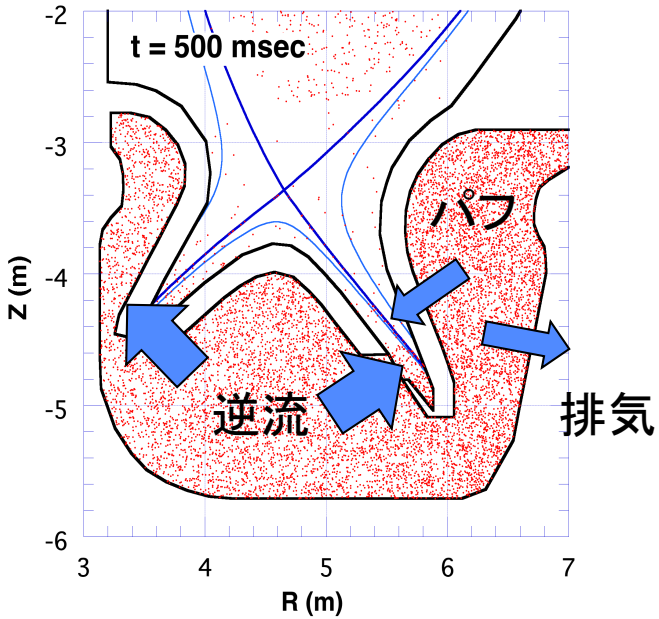
希ガスは壁に吸着せずポンプからのみ排気
（=粒子追跡終了に長時間が掛かる）

アルゴンのパフと排気のバランスには、
長時間（10秒程度）かかる。



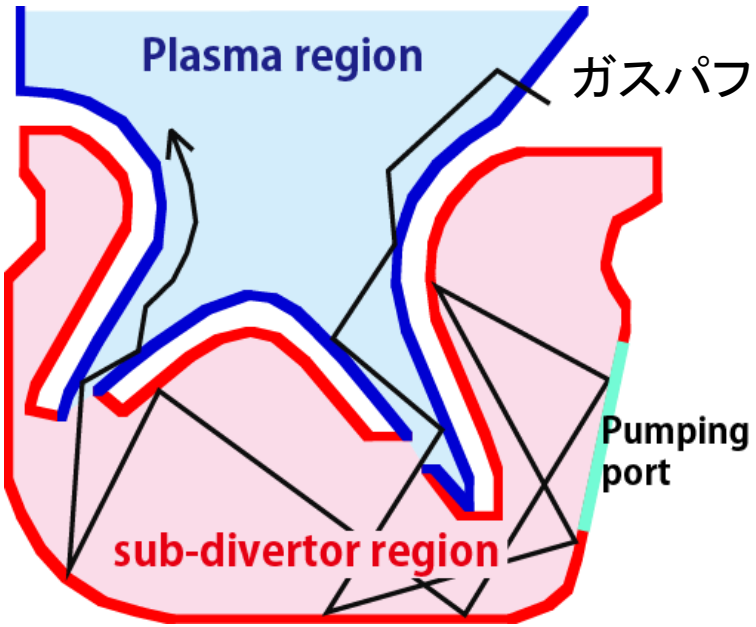
定常計算におけるテスト粒子分布の推移



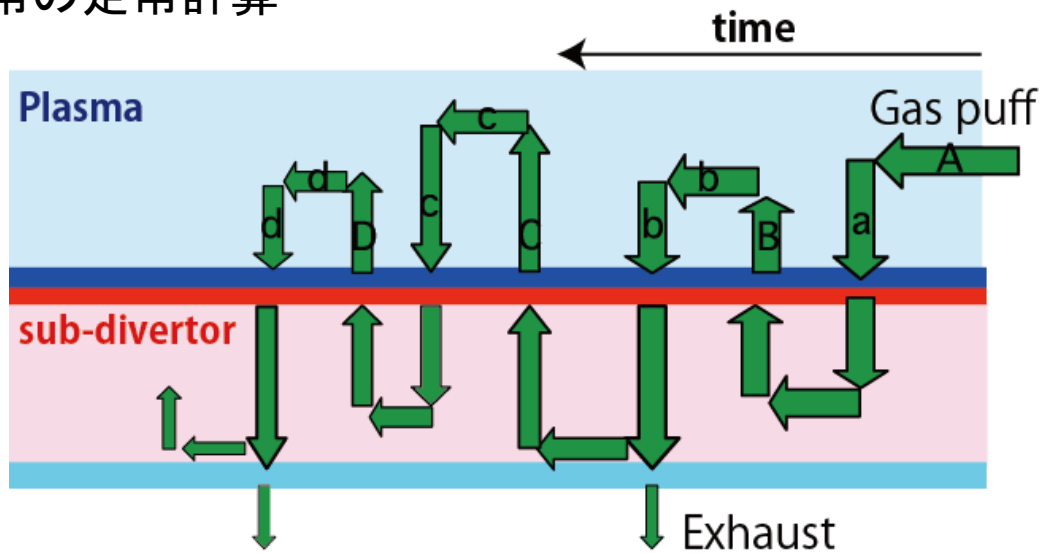


時間が経つと、ほとんどのテスト粒子は、排気系の領域にある。この段階では、プラズマへの影響は少なく、計算の無駄

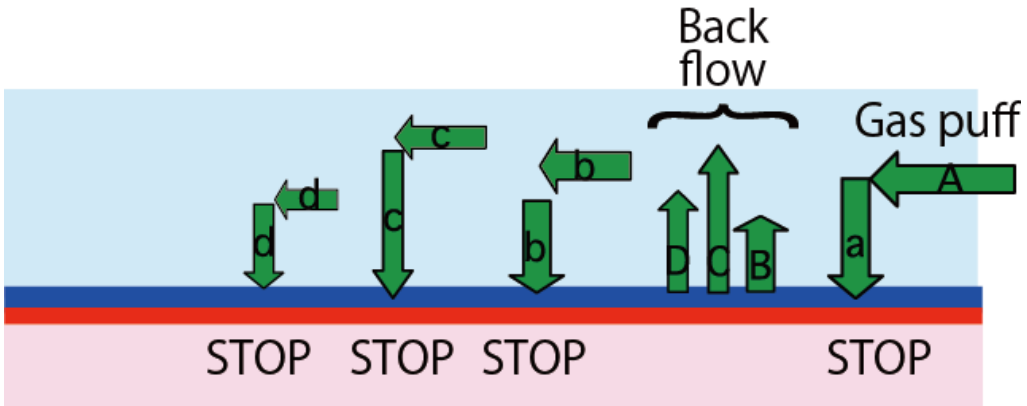
バックフローを考慮した不純物排気モデル



通常の定常計算



バックフローを仮定した排気モデル

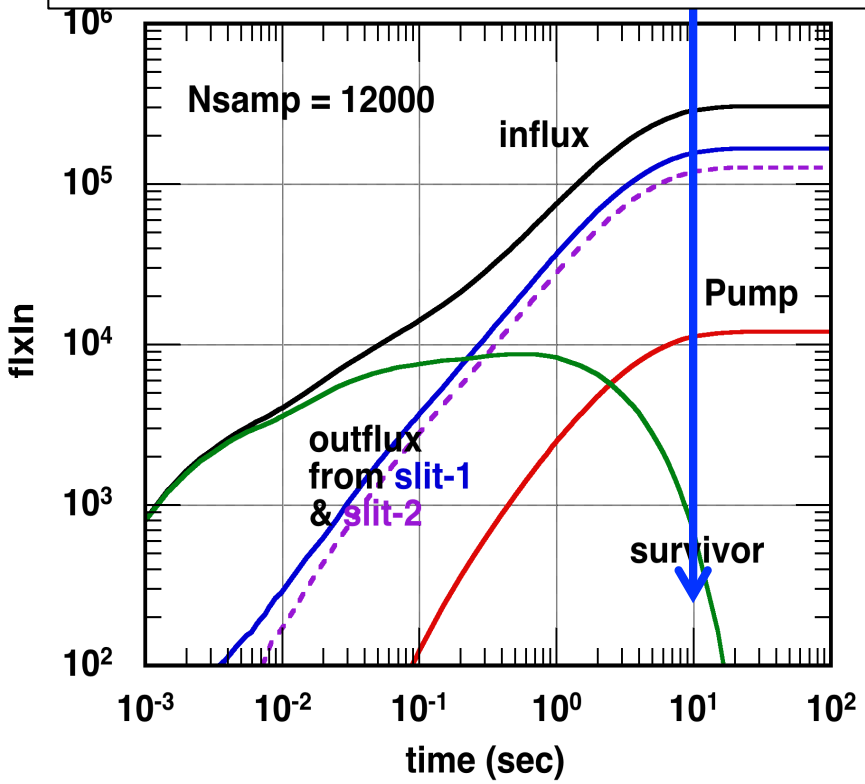


バックフローを事前に求め、
ガスパフソースとして与えることで、
サブダイバータ領域の計算を省略

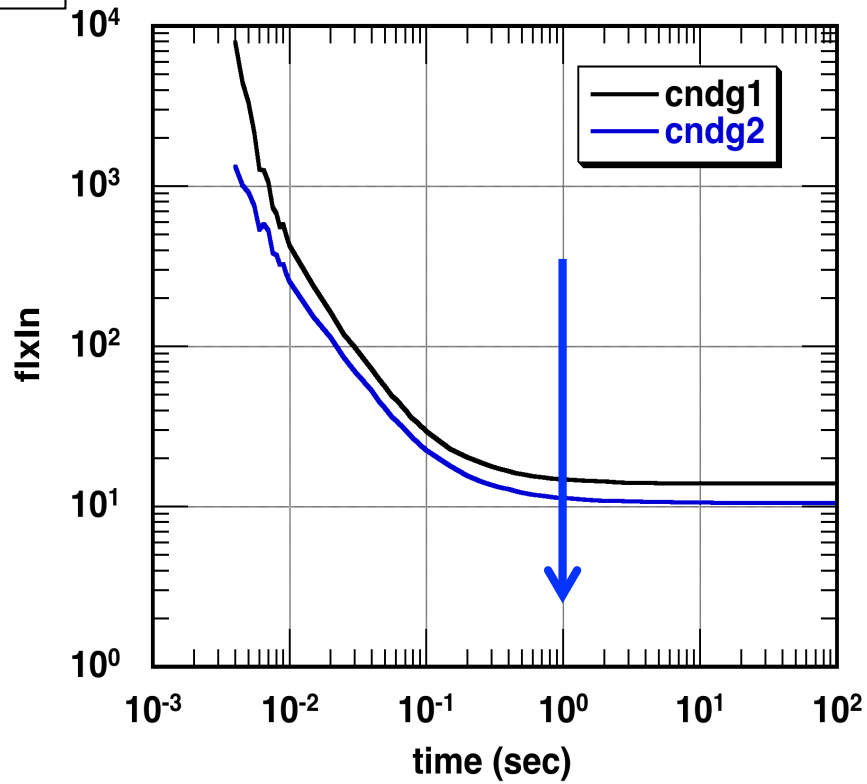
バックフロー量の計算： フラックスの比（コンダクタンス）

不純物輸送が準定常状態に達するには 10sec程度必要。
しかし、排気量に対するバックフローの比は～1sec迄の計算で充分求まる。

influx: サブダイバータへの流入フラックス
outflux1:排気スロット1からの逆流フラックス
outflux2:排気スロット2からの逆流フラックス
survivor:生存フラックス　pump:排気フラックス



cndg1: outflux1/pump
cndg2: outflux2/pump



計算時間について

定常計算は、ダイバータ特性時間は10 msec

時間ステップ幅は 0.2 μs　５万ステップが必要

プラズマ（SOLDOR）/ 中性粒子（NEUT2D、10回に1回計算）の計算

50000 x 0.4 sec + 50000/10 x 3sec = 9.7 時間

従来の不純物計算：　１回当たり600 sec （50回に1回計算）

50000/50 x 600 sec = 170 時間

新しい排気モデル

IMPMCの計算（スリットで計算停止）：25 sec

コンダクタンスの更新：60 sec これはIMPMC計算10回に1回行う

50000/50 x 25 sec + 50000/(50*10) x 60 sec = 8.6 時間

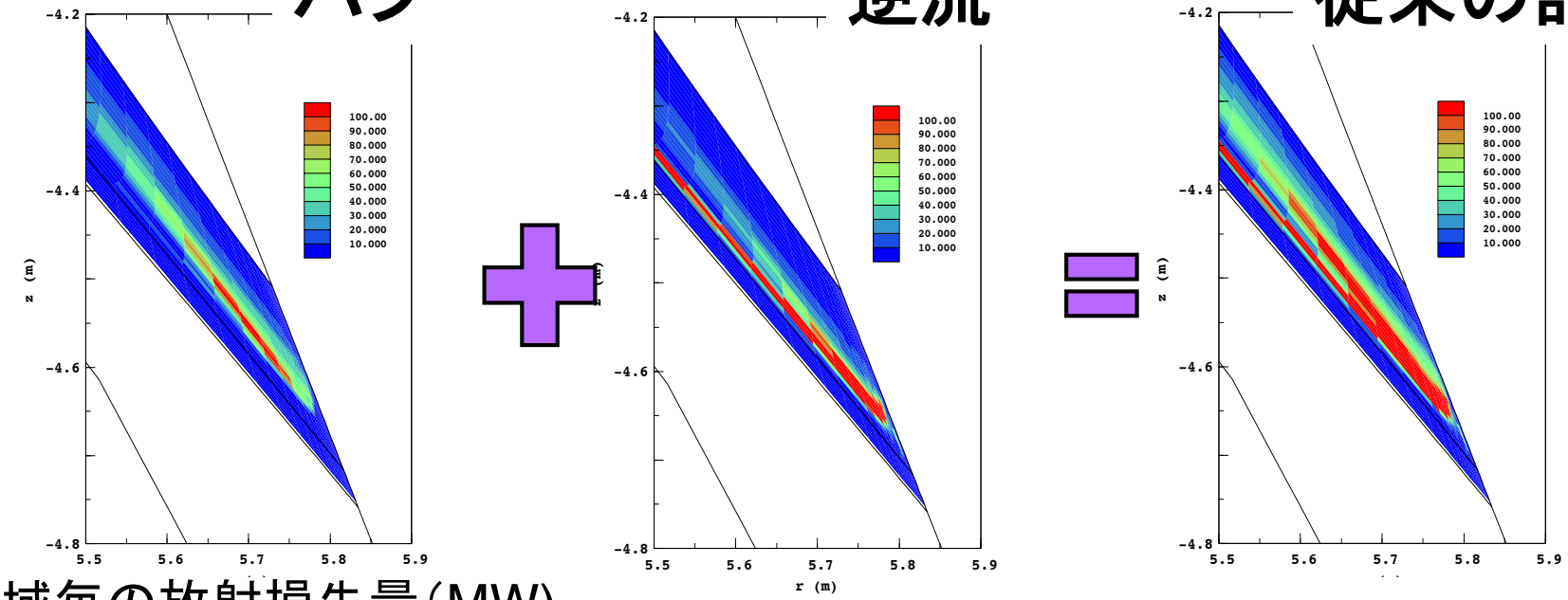
新排気モデルの採用により、計算時間は

180時間　から　19時間　へ大幅短縮

妥当性の検証　slimCSを例に

外側ダイバータ板近傍におけるArの放射分布

パフ　＋　逆流　＝　従来の計算



領域毎の放射損失量(MW)

		外側DIV	SOL	内側DIV	外側プライベート	内側プライベート	エッジ
パフ	Arpf	41.0	31.1	10.1	0.5	0.2	36.3
逆流	Arbk	68.2	38.0	42.7	9.6	3.4	43,2
	total	109.2	69.1	52.8	10.1	3.6	79.5
定常	Arst	110.8	70.6	52.9	10.0	3.7	80.7

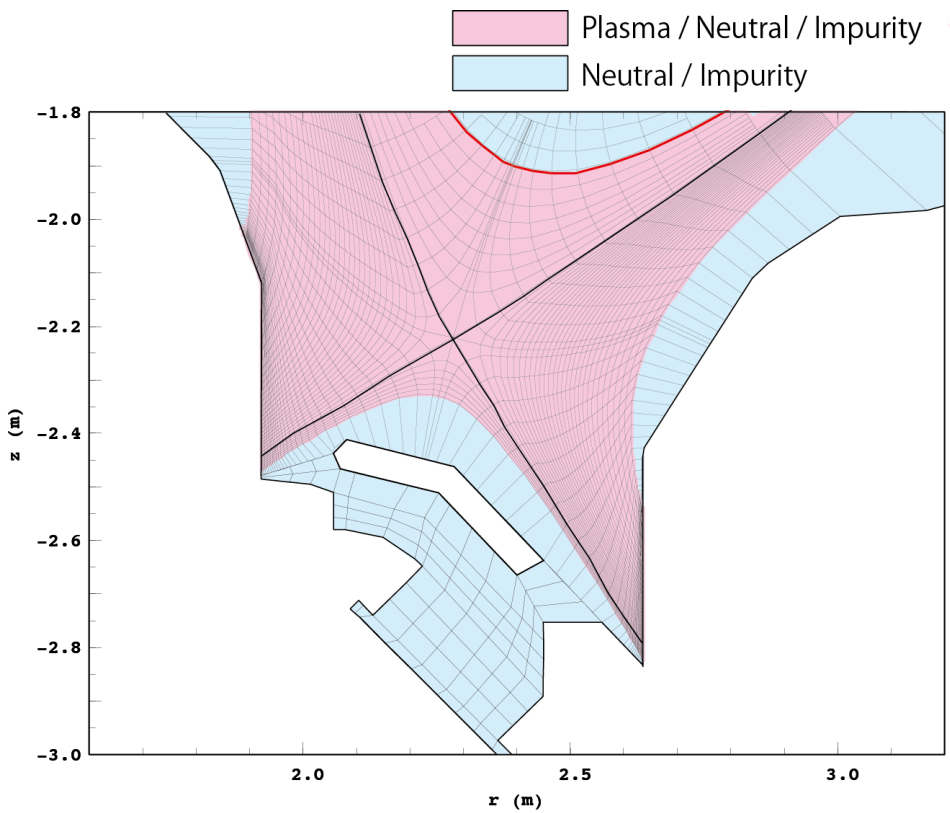
バックフローを考慮した新排気モデルの
JT-60SAダイバータシミュレーションへの適用

完全非誘導電流駆動シナリオの成立性の解析

SAの完全非誘導電流駆動シナリオでは、ECによる電流駆動効率の観点から、炉心密度を高くできない。

→ ダイバータ熱負荷とSOL低密度の両立性が課題

→ 不純物ガスパフによるダイバータ熱負荷低減が必須



Input parameters for simulation

Q_{total} = 37 MW
(4MW out of 41MW is assumed to be radiated in the core plasma),

G_{ion} = 2.8 x10^{21} s^{-1} (NBI),

G_{puff}^{osol} ~ 5.0x10^{21} s^{-1},

S_{pump}^{in}= 50 m^3/s,

D = 0.3 m^2/s,

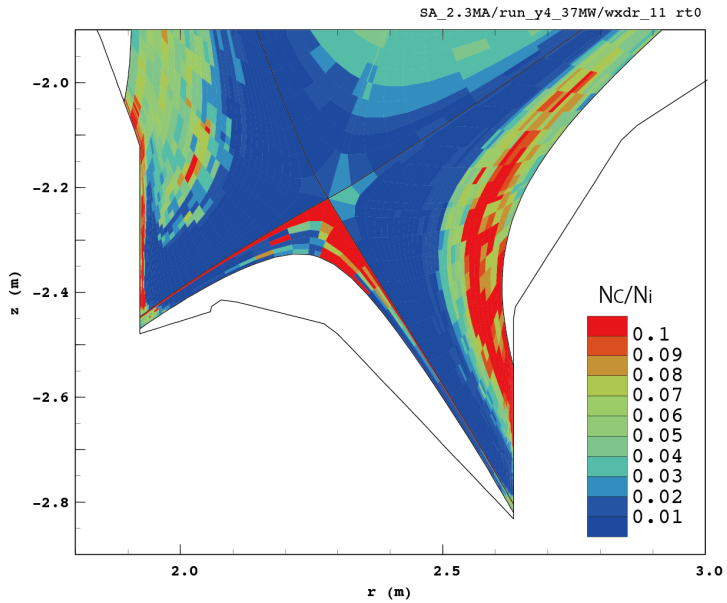
$\chi_i = \chi_e = 1.0\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}$

Y_{chem} = 4%

Arガスパフなしのケース

Cは物理スパッタリング及び化学スパッタリングにより壁より自然発生。

IMPMCによりプラズマ分布と矛盾のない放射分布が得られた。

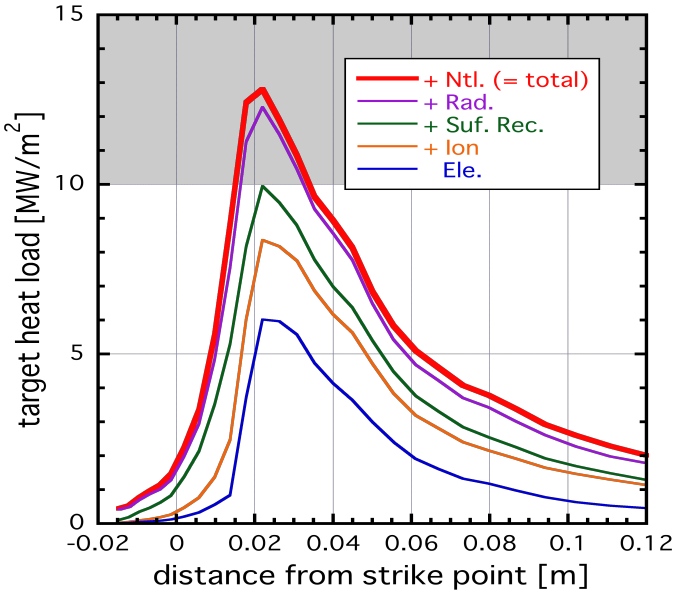


しかし、SONICシミュレーションの結果、

SOL密度: n_{mid} ~ $3.5\times10^{19}\,m^{-3}$
ピーク熱負荷: q_{peak} ~ $13\,MW/m^2$

一方、完全非誘導電流駆動シナリオでは、
- n_{mid} < $1.7\times10^{19}\,m^{-3}$ for ECCD駆動効率,
- q_{peak} < $10\,MW/m^2$

が要求。



Intrinsicな不純物(C)だけではシナリオが成立せず、不純物ガスパフが必要

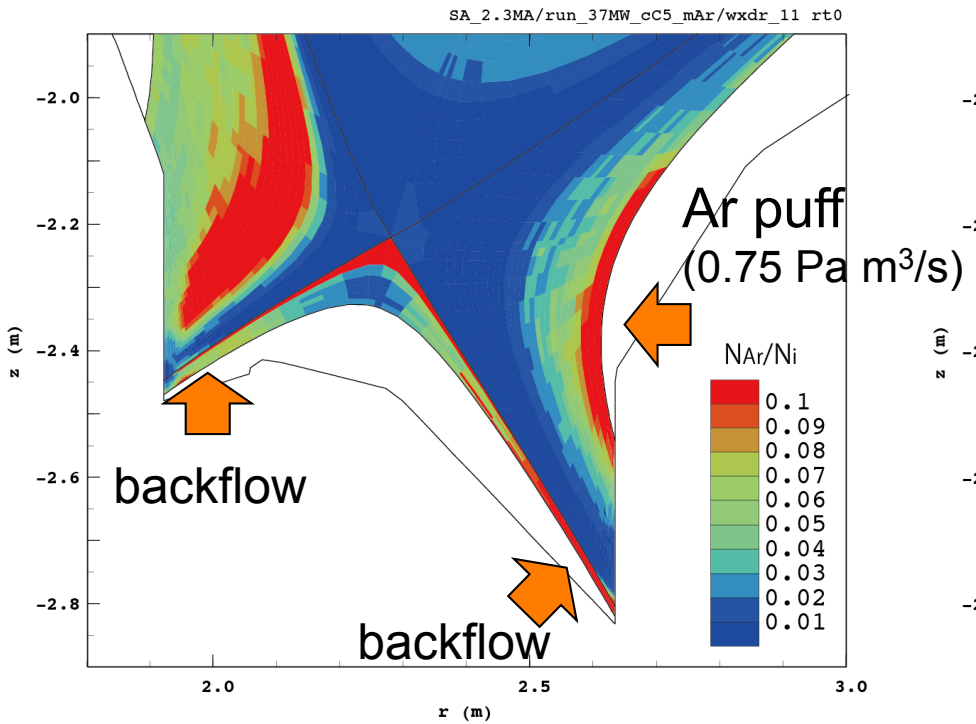
Arガスパフケース

Ar : IMPMC with new exhaust model

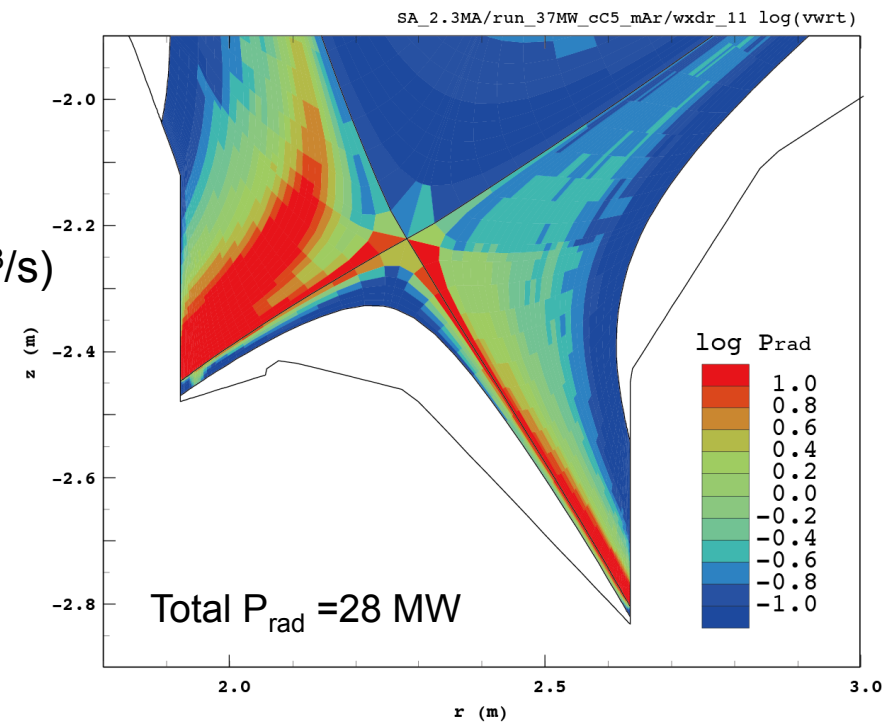
C : the non-coronal model with f_{imp}=5% in div and f_{imp}=1% at else
(f_{imp} はIMPMCで計算されたC放射分布を再現するように調整)

0.75 Pa m^3 /s 程度のArガスパフを行うことで、
不純物放射は24.6MWから28MW（17.2(Ar) + C10.8(C))に増加

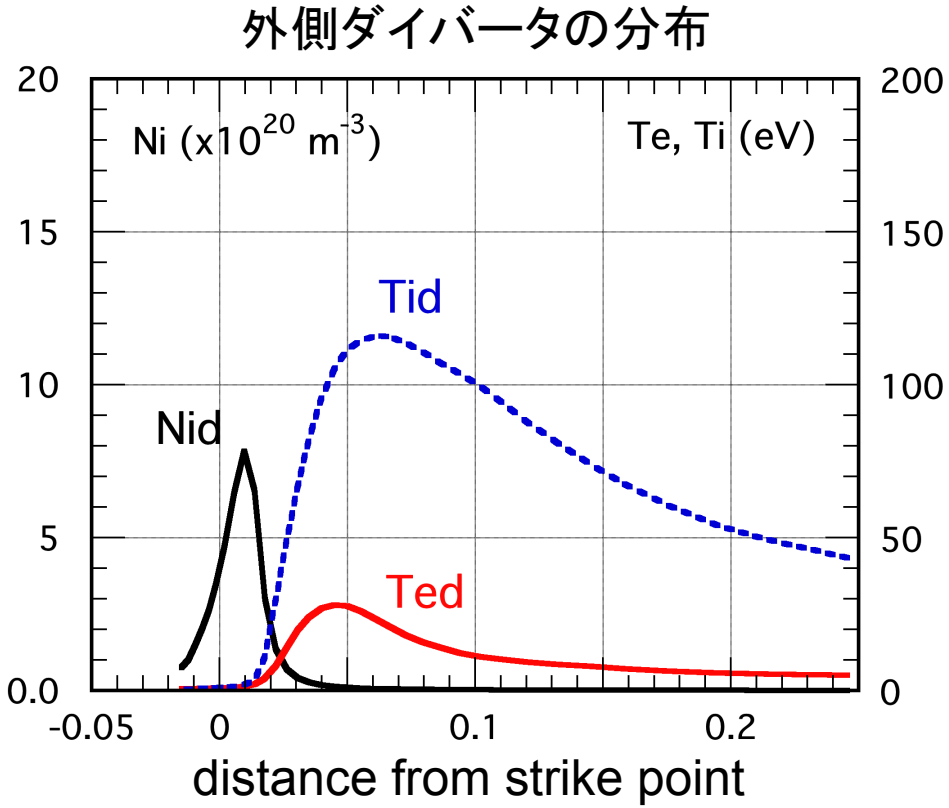
N_{Ar}/N_i

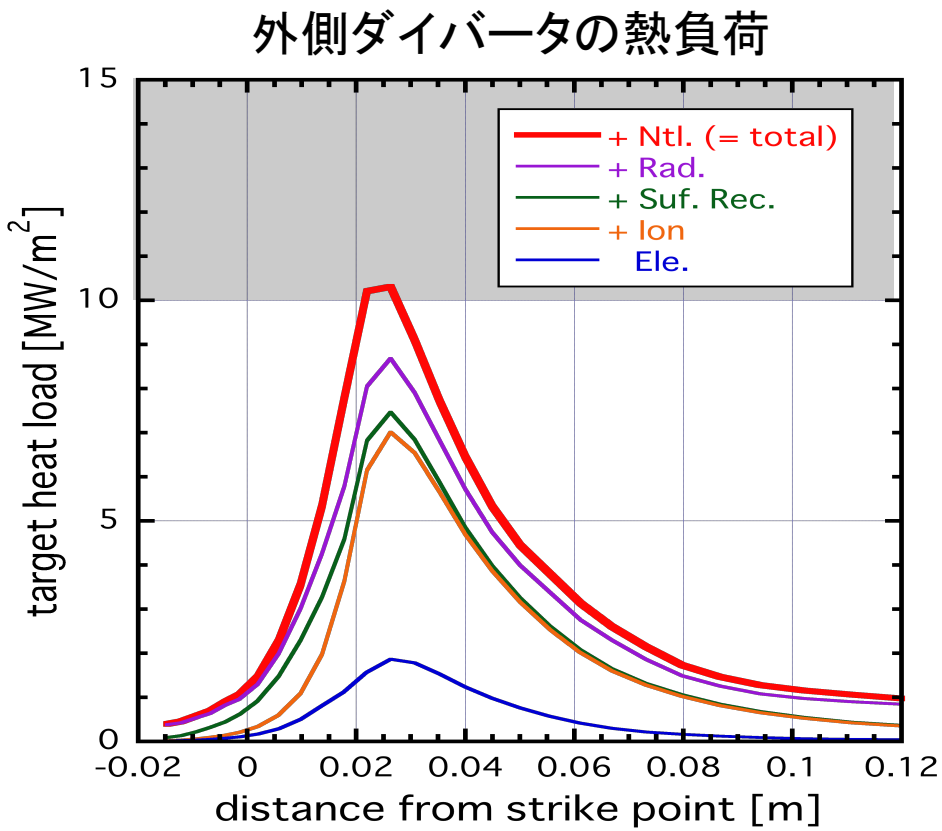


$\log(P_{rad})$



Arガスパフケース





0.75 Pa m^3/sのArガスパフにより、
低密度 n_{mid} ~ 1.5×10^{19} m^{-3} と低熱負荷 q_{peak}~10MW/m^2 を同時達成

→ **完全電流駆動シナリオの成立がSONICにより確認できた**

まとめ

- モンテカルロ法を用いた希ガス不純物のダイバータシミュレーションで問題となる計算時間の増加を解決するために、排気スロットからのバックフローを考慮した排気モデルを新たに開発した。
- 新排気モデルを用いることで、SONICの収束計算は、180時間から19時間へ10倍程度高速化された。

- 新排気モデルを実装したSONICを用いて、JT-60SAの完全非誘導電流駆動シナリオにおけるダイバータの成立性を調べた。
- 自然に発生する炭素不純物のみでは、赤道面密度及びダイバータ熱負荷は目標値を上回り、シナリオの成立は難しい。
- 一方、Arを0.75Pam^3/s程度添加することで、赤道面密度は目標値である1.7x10^{19}m^{3}を下回り、同時にダイバータ熱負荷も10MW/m^{2}程度となり、完全電流駆動シナリオが成立することを示した。

- 今後はSONICを複数種不純物種に対応させ、より信頼性の高い解析をすすめる。