ITER及びJT-60SAに向けた大電流負イオンビームの長パルス化の進展

2016 / 3 / 14 ～ 16

若手科学者によるプラズマ研究会

日本原子力研究開発機構

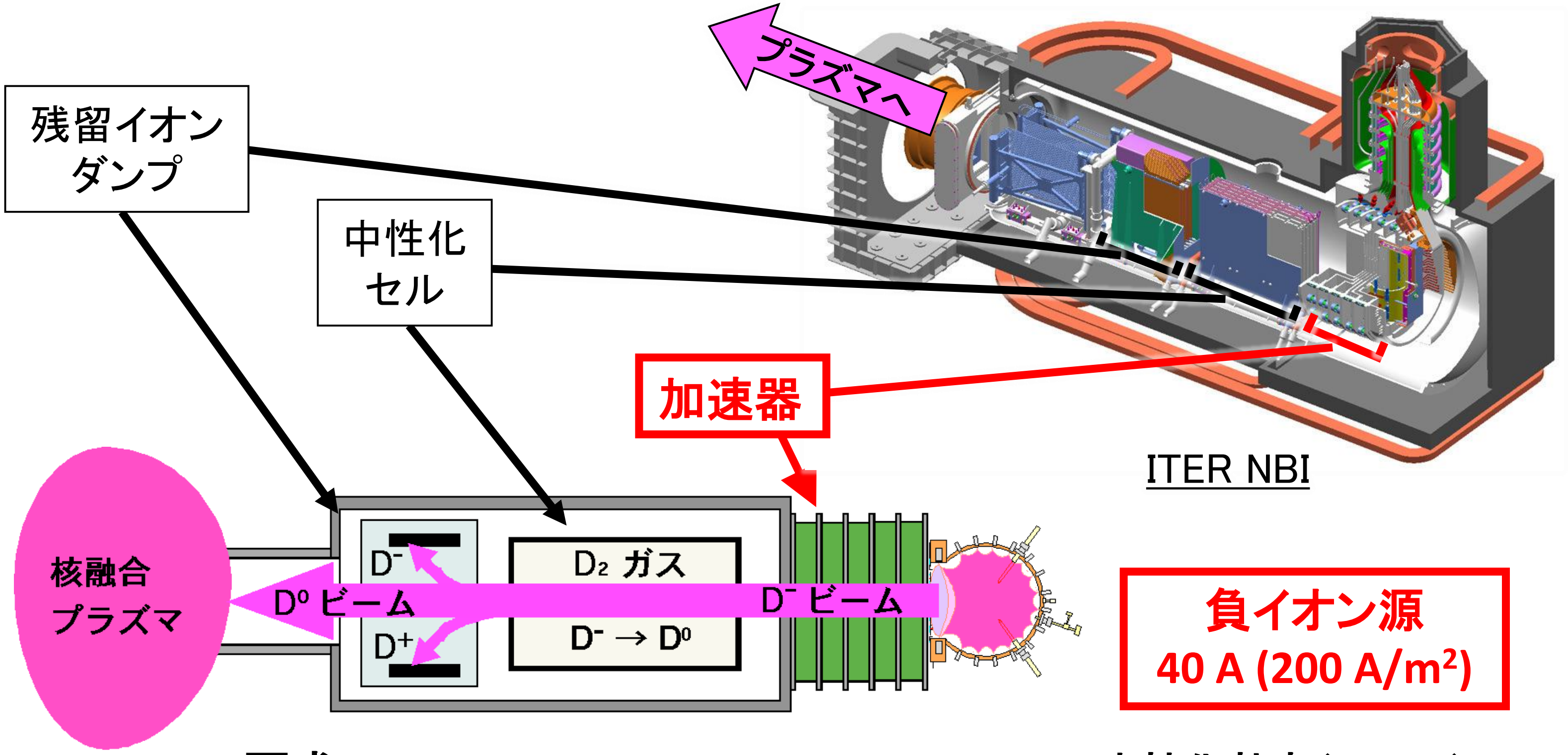
市川　雅浩、平塚　淳一、NB加熱開発グループ

中性粒子入射装置

Neutral Beam Injection (NBI)=中性粒子入射

1)中性の(重)水素ビームでプラズマを加熱する

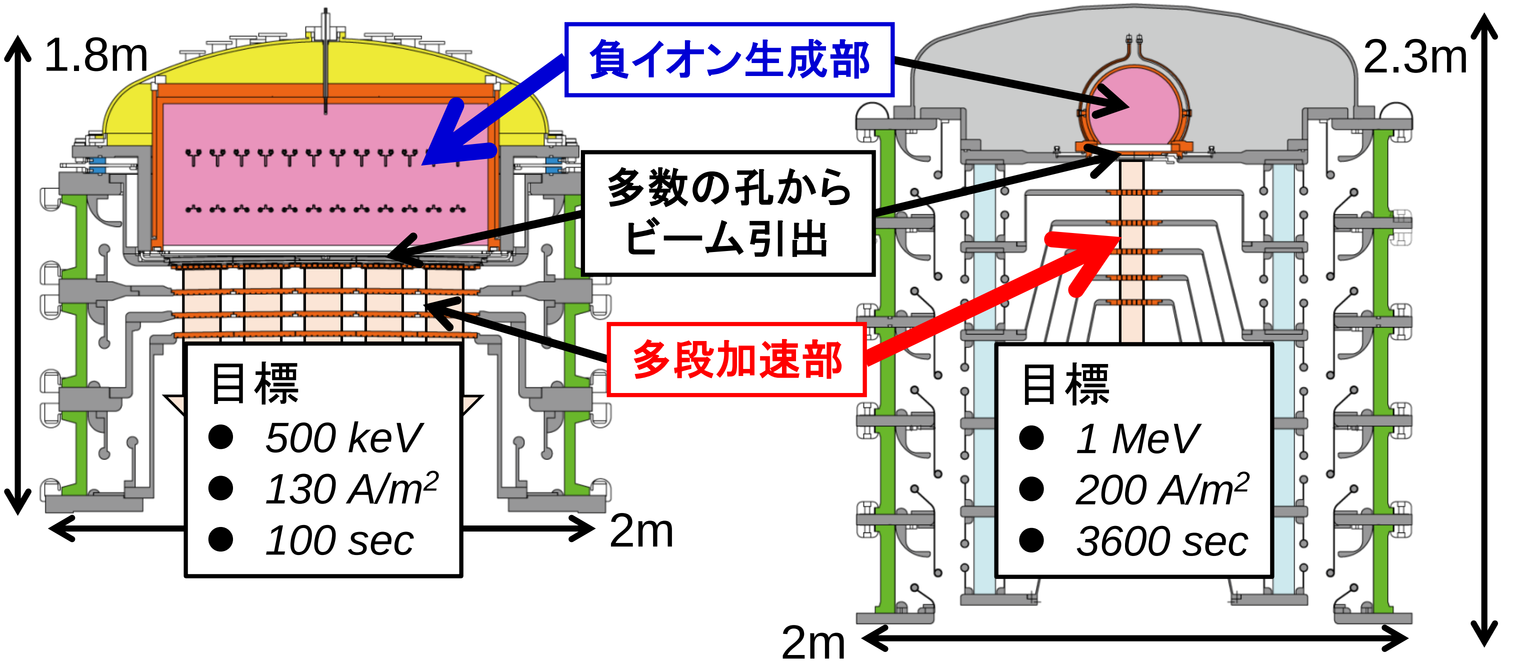
2)プラズマ中に電流を流す(電流駆動)



ITER要求
=1 MeV, 16.5 MW, 3600 sec

中性化効率(1 MeV)
正イオン~0%　負イオン~60%

多孔多段加速器による長パルス負イオン源の開発



<JT-60負イオン源>

- 実機JT-60SA用負イオン源
- 3段の加速器
- 1.1×0.45 m^{2}大面積引出領域
- 大電流＆長パルス負イオン生成

<MeV級加速器>

- 日本が調達するITER用加速器を模擬
- 5段の加速器
- 高エネルギー、大電流密度

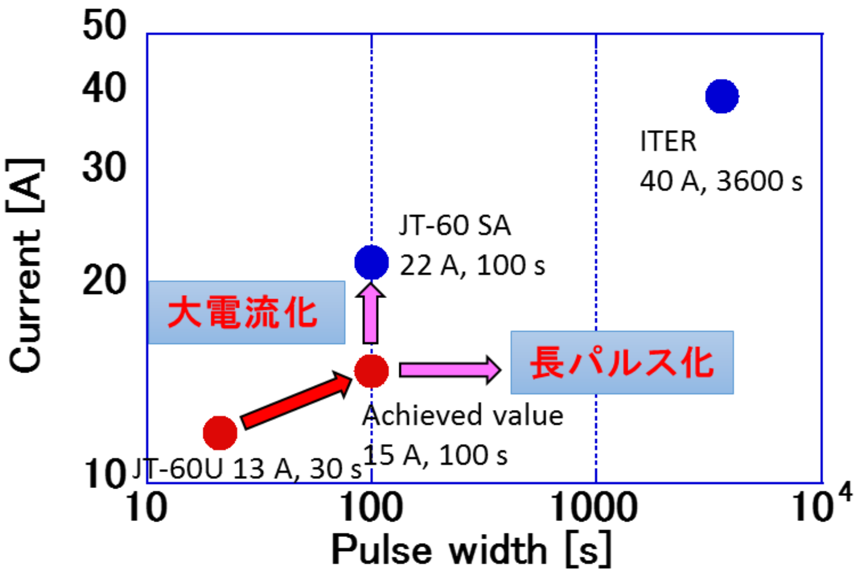
=高パワー密度＆長パルス負イオン加速

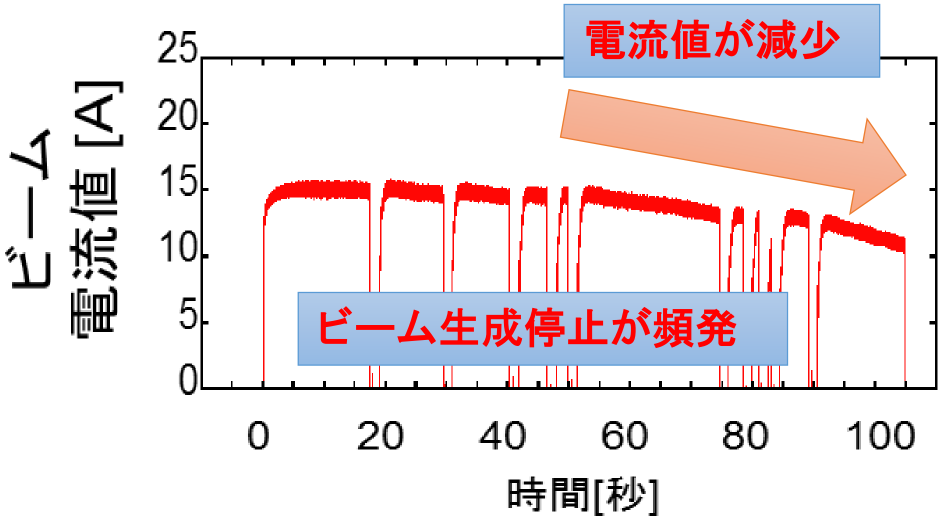
JT-60SAやITERの要求を満たす負イオン源の実現を目指し共通課題に向けた開発を実施

JT-60負イオン源

長パルス負イオン定常生成

長パルスビーム生成における課題





これまでに15 A、100秒ビーム生成を達成
しかし・・・

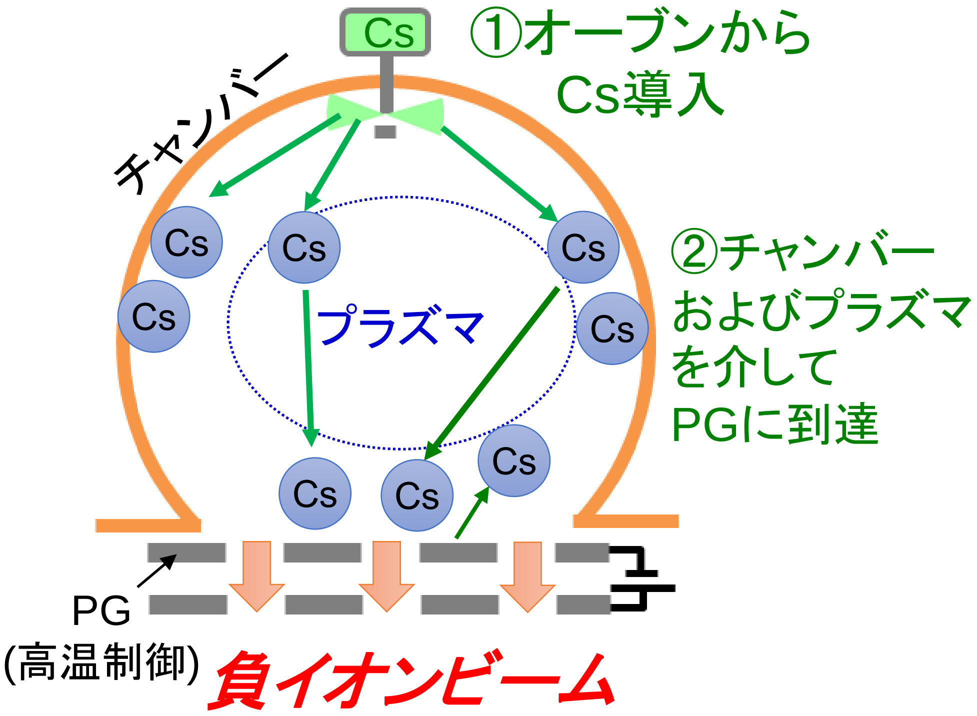
- **JT-60SA要求値: 22 A, 100 s**
- **ITER要求値: 40 A, 3600 s**

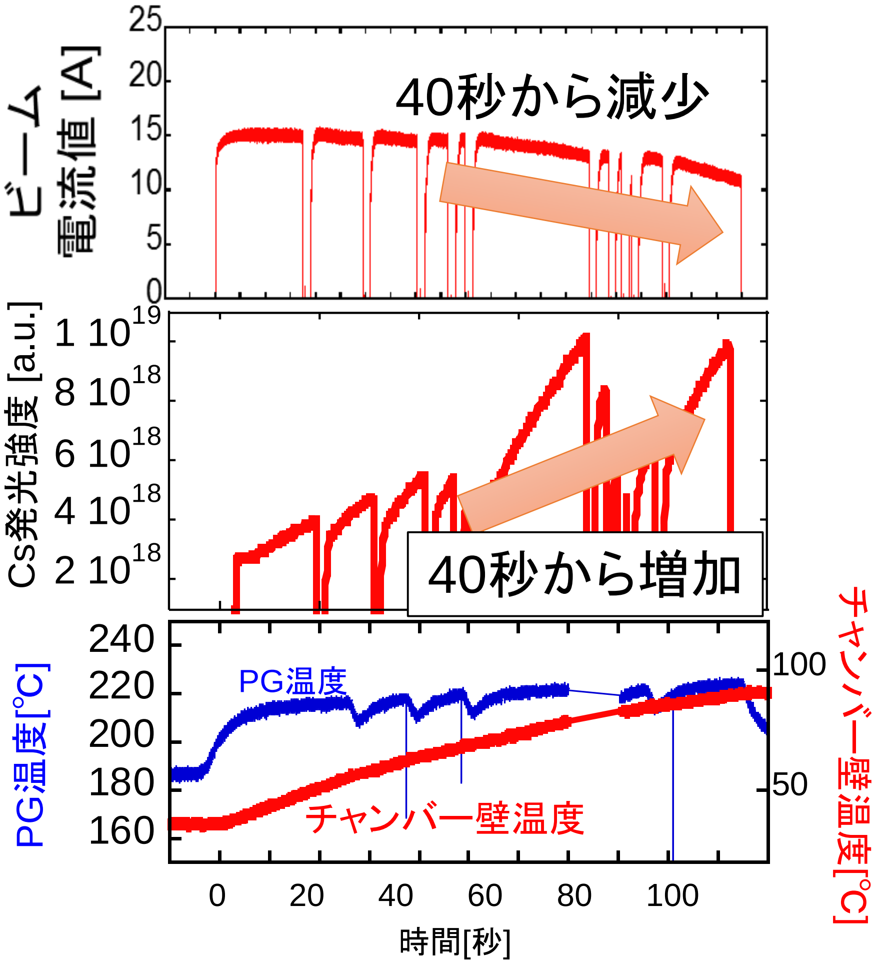
更なる大電流、長パルス化が必要

更なる大電流、長パルスを達成するための課題

- パルス数十秒後に徐々にビーム電流値が低下
- アーキングとよばれる異常短絡放電によりビーム生成の瞬間的な停止が頻発

長パルス中のビーム電流値減少原因解明





【着眼点】長パルス中の

- 空間中のCs量変化
- 各領域の温度変化

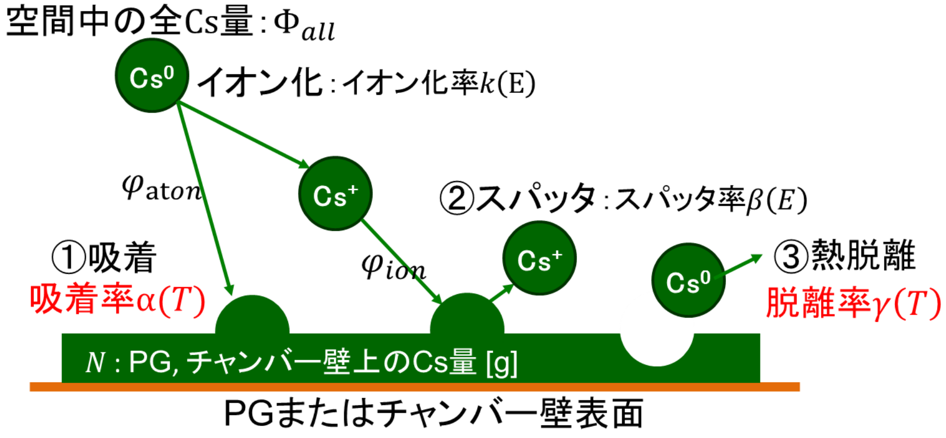
} 負イオン生成へ影響

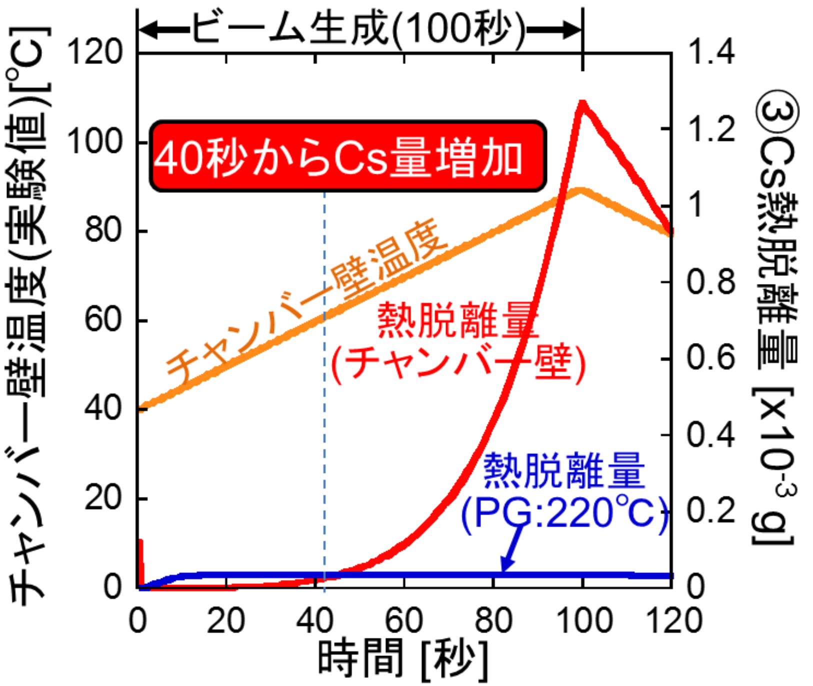
長パルス時の空間中のCs挙動イメージの妥当性を解明するためにCsの吸着・脱離をモデル化

長パルス中のビーム電流値減少原因解明

長パルス時のPGおよびチャンバー壁面のCs吸着・脱離をモデル化

$$\frac{dN(T,E)}{dt} = \underbrace{\alpha(T)\varphi_{atom}}_{①\ 吸着} + \underbrace{(1-\beta(\mathrm{E}))\varphi_{Ion}}_{②スパッタ} - \underbrace{\gamma(\mathrm{T})N}_{③\ 熱脱離}$$





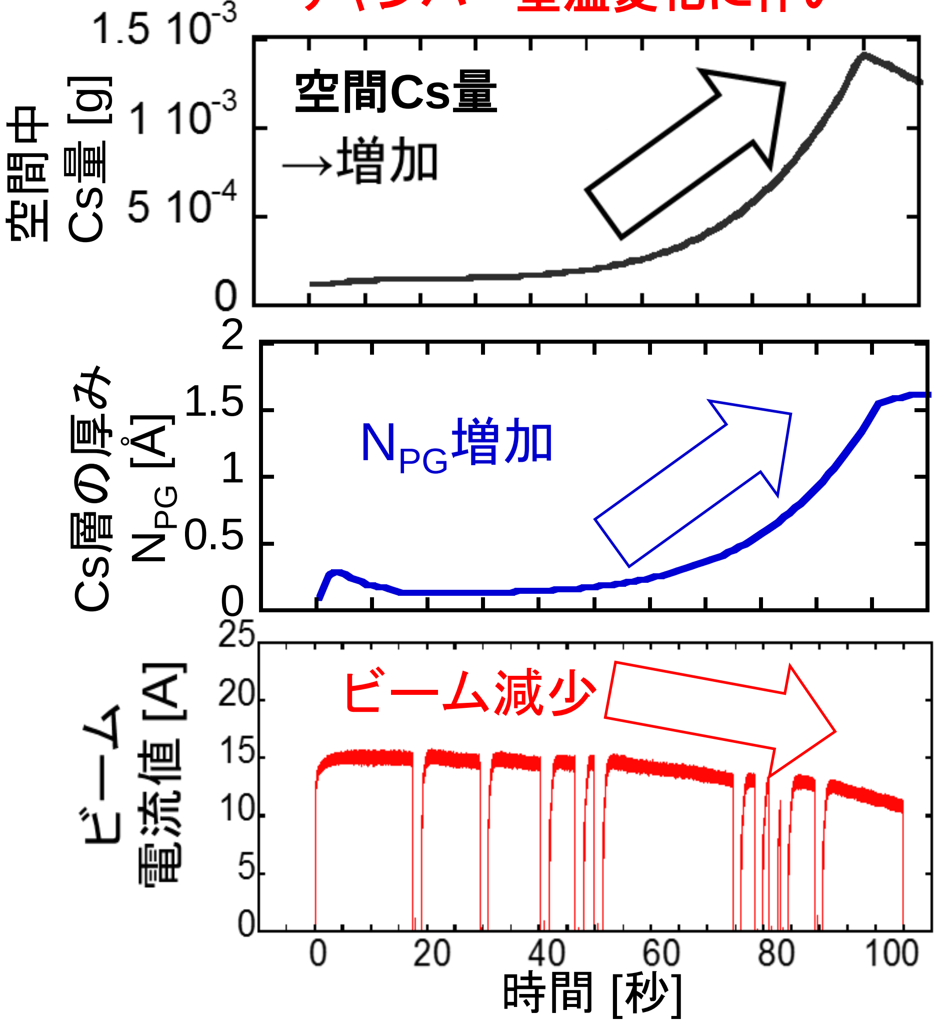
これまで不明であったCs吸着率α 、脱離率γの温度依存性を予備実験で実測→上式に適用

長パルス時の空間中のCsは、チャンバー壁からのCs脱離が支配的

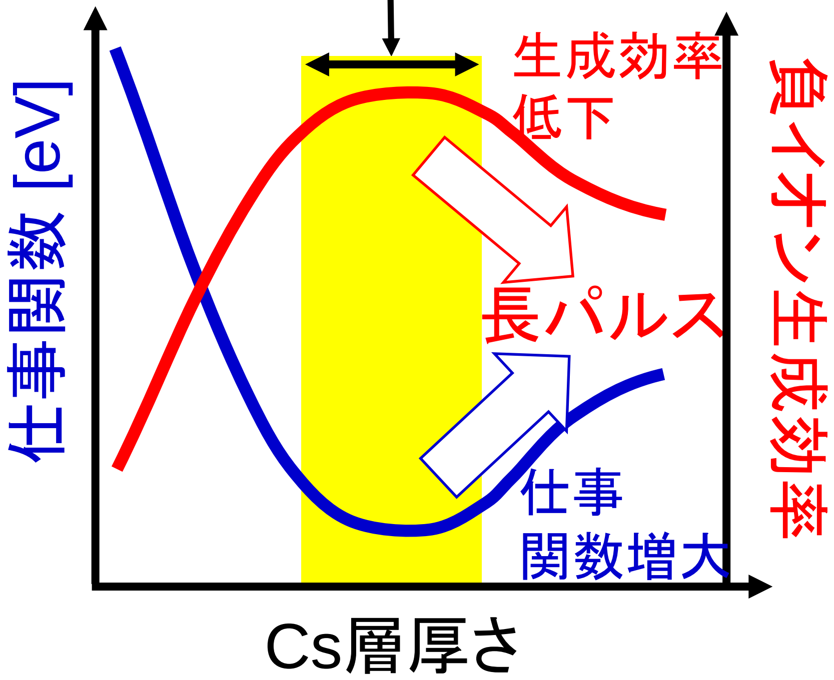
チャンバー壁にCs吸着 → 長パルスで壁温度上昇 → チャンバー壁の熱脱離率急増 → **多量Cs放出**

推察される負イオン生成効率低下の原因

チャンバー壁温変化に伴い

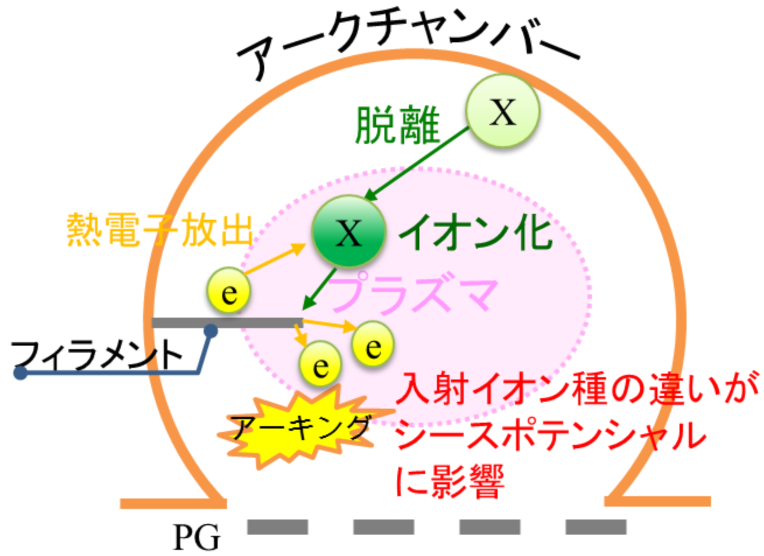


短パルス運転時：低仕事関数領域
＝高負イオン生成効率領域で大電流化



長パルス運転時には、PG表面のCs層が厚くなることで、仕事関数が増大し、負イオン生成効率が低下したこと示唆

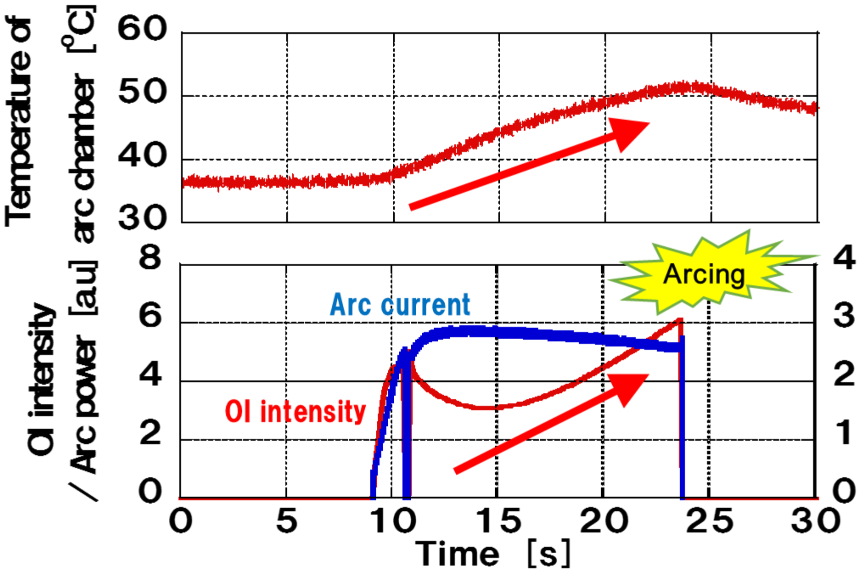
長パルス中でのアーキング増加原因解明



大電流、長パルス運転時にはアーキングが頻発

- ビーム安定生成を阻害
- フィラメント断線

⇒アーキング発生機構を理解し、抑制することが必要



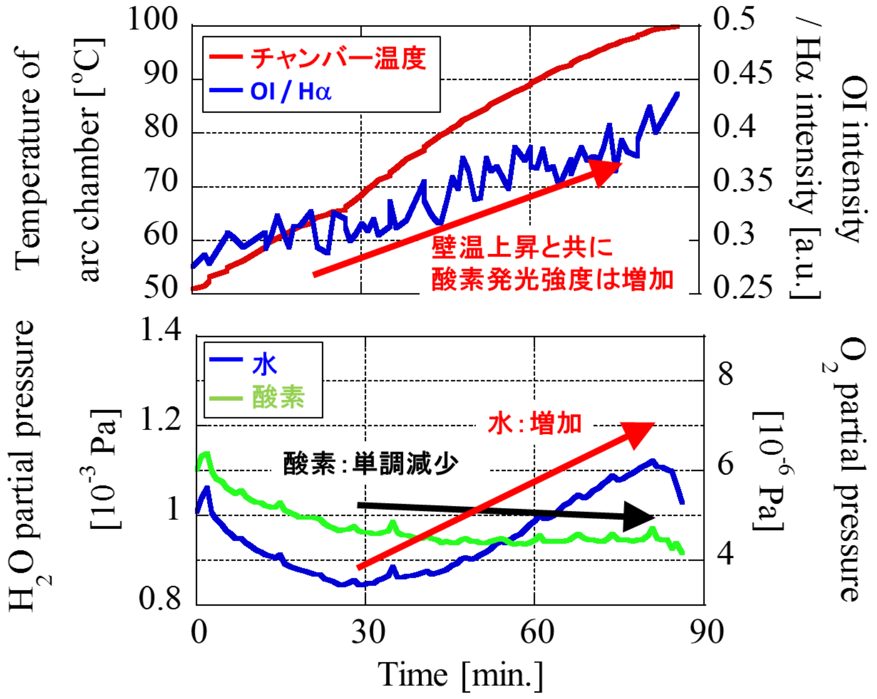
- チャンバー壁温上昇に伴い酸素の発光強度が増加
- 酸素発光強度が増加し、アーキング発生

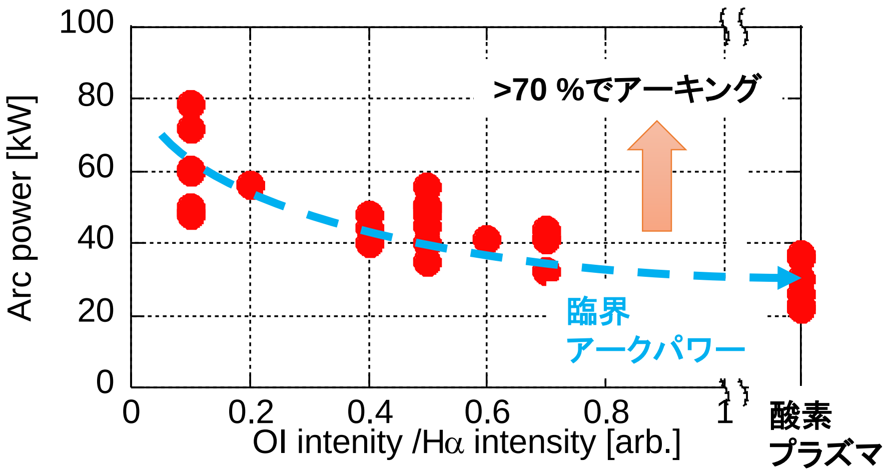
酸素がアーキングの原因の一つである可能性

パルス中の壁温上昇に伴う酸素の増加とアーキング発生率の関係

酸素によるアーキングへの影響

O2ガスを外部から導入して能動的に酸素量をコントロール
⇒アーキング頻発の臨界アークパワーの酸素量による変化を測定





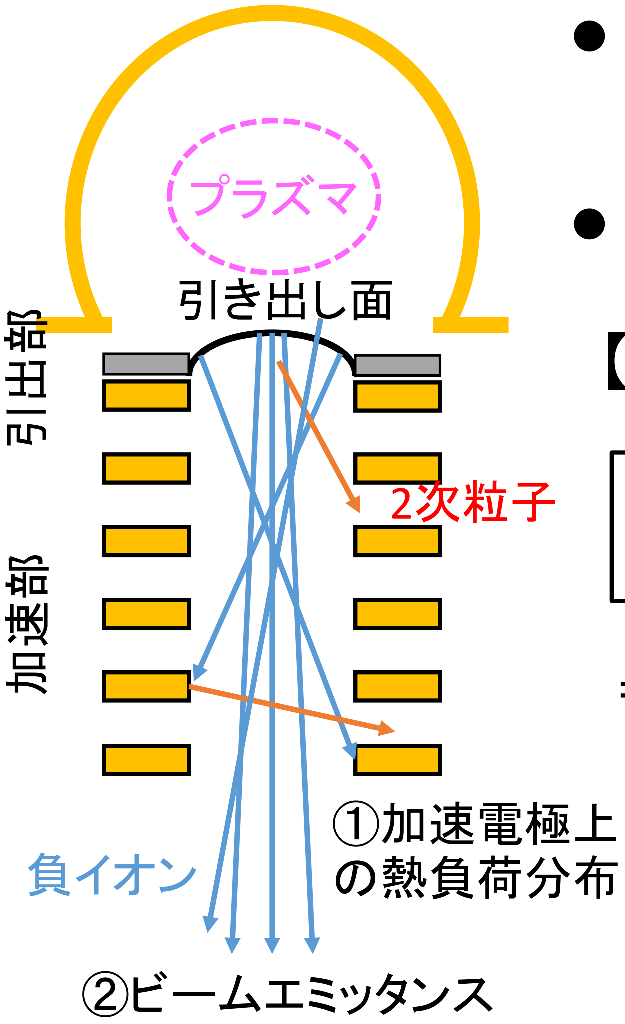
- 酸素量増加により臨界アークパワーが低下
- プラズマ中の酸素は水由来
  - ➢ 酸素によるアーキング増加を低減するにはベーキングによる壁面吸着水分の低減が有効

もう一つの不純物としてCsに関して研究継続中

MeV級加速器

負イオン長時間加速

負イオン加速器内の負イオン軌道の理解



- 負イオンは引き出し面（メニスカス）形状次第で様々な軌道を描き、一部は電極に衝突し、一部は2次粒子を発生させる。
- 熱負荷の抑制 ← 負イオン軌道の理解が必要。

【実験的なアプローチ】

負イオン全体の軌道を理解するためには
負イオンと2次粒子の位置と量の測定が必要。

⇒ ① 電極に衝突する分：加速電極上の熱負荷分布

② 加速器を抜ける分：ビームエミッタンス

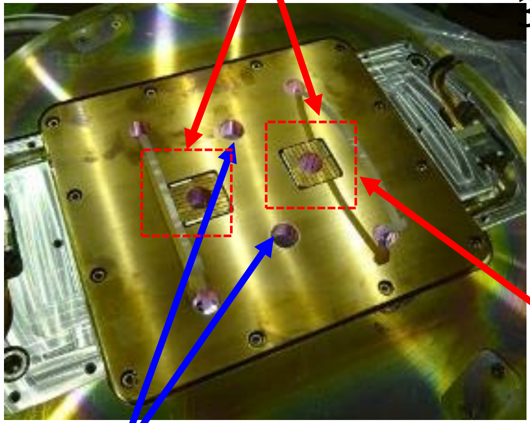
①、②を直接測定できれば、逆に辿って負イオン軌道を再現することができる。

今回は、加速電極上の熱負荷分布を直接測定できる加速電極を開発し、MeV級加速器において試験を行った。

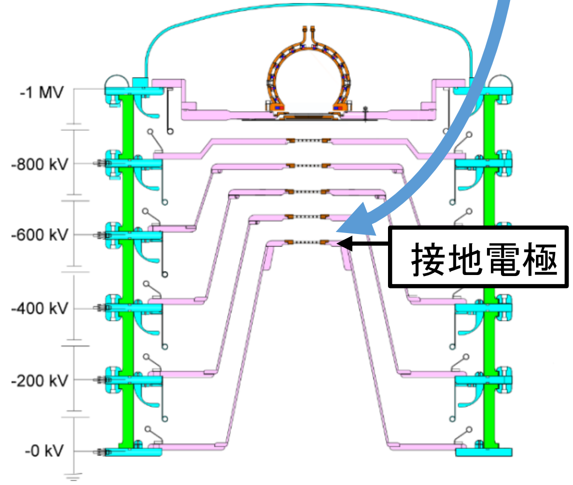
熱負荷分布を直接測定する電極を開発

【電極外形】

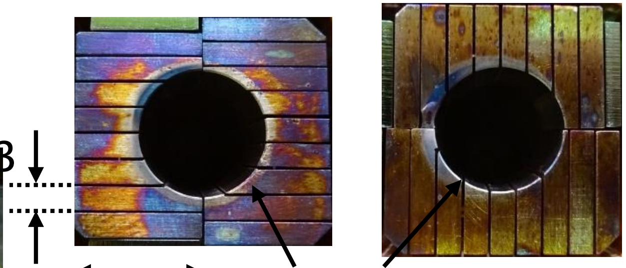
熱負荷分布測定電極



通常の加速孔

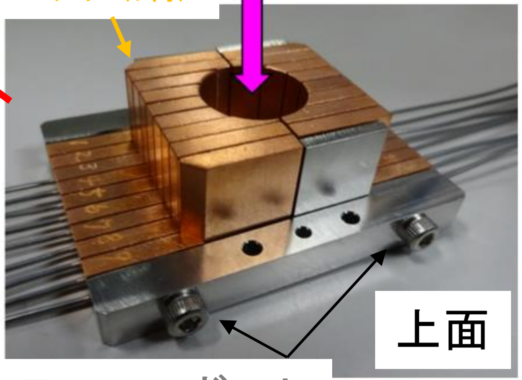


ブロック間隙間0.3mm

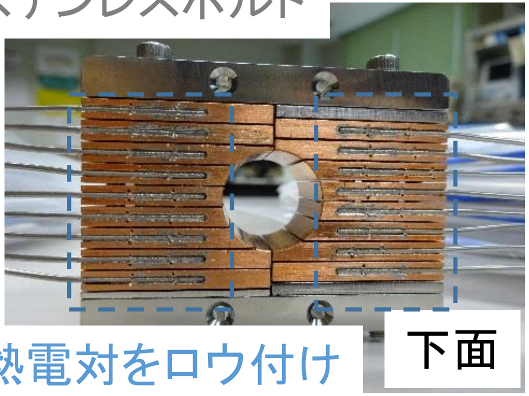


ブロック（銅）

H⁻ beam



ステンレスボルト

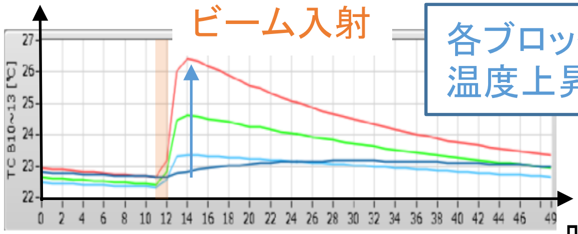


熱電対をロウ付け

【測定方法】

- ビーム孔周辺を17個×2の銅ブロックで構成。
- 各ブロックの底面に熱電対をロウ付け。

各ブロックの温度 [℃]



時間 [s]

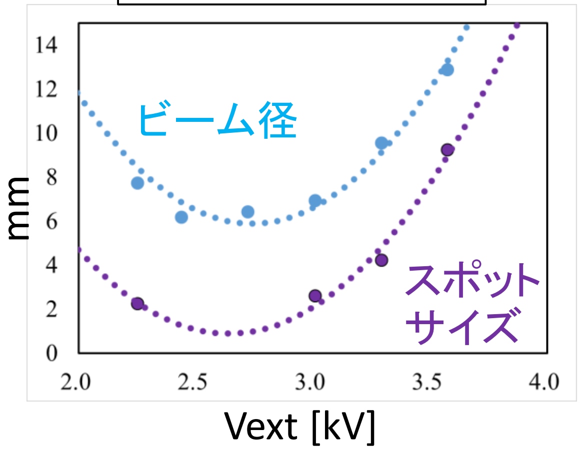
➡ 各ブロックに入射した熱量

➡ 加速孔周辺の熱負荷密度分布

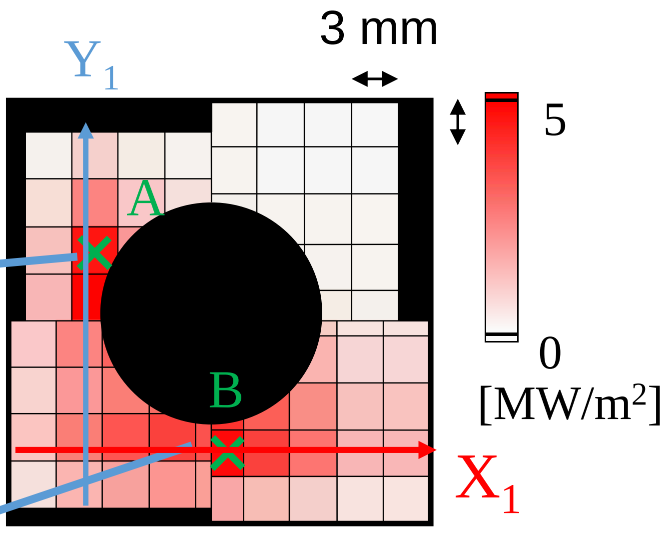
計34個のブロックの温度上昇から、ビーム入射時の熱負荷密度分布を測定する。

熱負荷分布測定

引き出し電圧依存

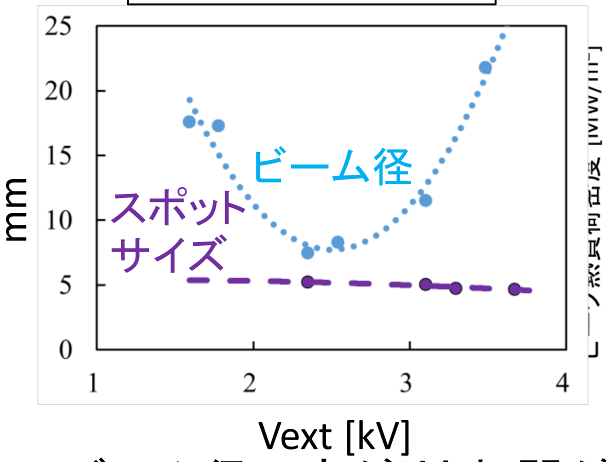


ビーム径の広がりと相関

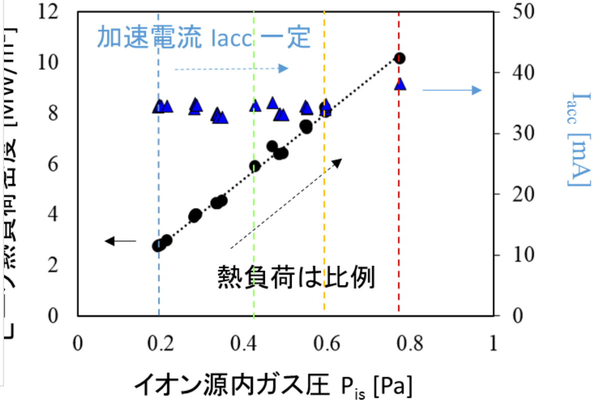


２箇所ホットスポットを確認

引き出し電圧依存



ガス圧依存



ビーム径の広がりと相関がなく、ガス圧に依存

A点はイオンビーム由来
B点はガスとの衝突で生じる（ストリッピング）電子由来

負イオンと電子による熱負荷を別々に測定することに成功

まとめ

ITER及びJT-60SAに向けた大電流負イオンビームの長パルス化おいて以下の成果を得た

負イオンの定常生成について

- 長パルス運転時のビーム強度の低下とPG表面上の吸着Cs量の増加の間の相関を得た。
- 酸素によりアーキングが助長されることを明らかにした。

負イオンの長時間加速について

- 引き出し孔近傍の熱負荷分布を測定し、強度の高い2点がそれぞれ負イオン由来、ガスとの衝突で生じる電子由来であることを明らかにした。

得られた成果はJT-60SAやITERの負イオン源の設計に反映