



逃走電子のアバランチ現象に対する 不純物種依存性の解析

松山顕之

QST 六ヶ所核融合研究所

逃走電子

<https://science.nasa.gov/science-news/>

$$E_c = \frac{n_e e^3 \ln \Lambda}{4\pi \epsilon_0^2 m_e c^2}$$

閾値電場(critical field):

逃走電子が発生する閾値

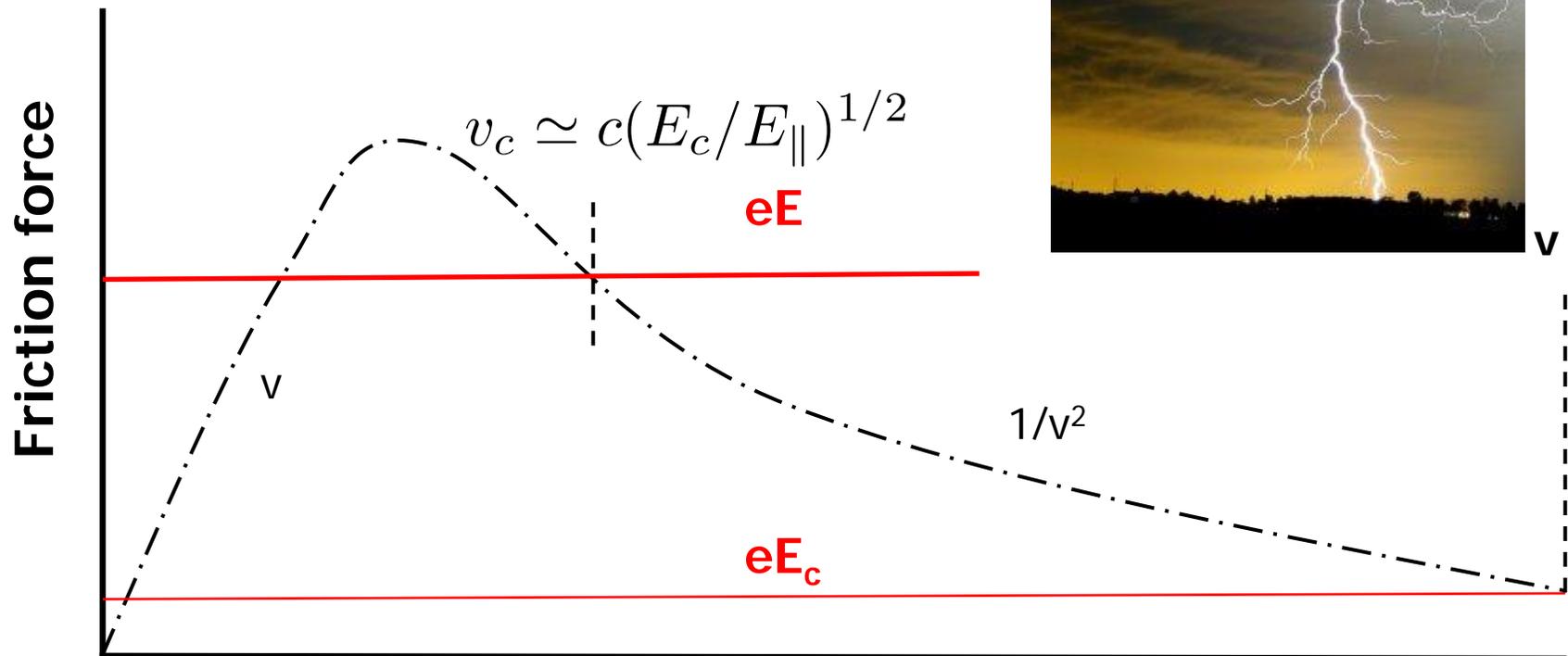
$$E_D = \frac{n_e e^3 \ln \Lambda}{4\pi \epsilon_0^2 T_e}$$

ドライサ-電場:

熱電子が逃走電子になる電場



$v = c$



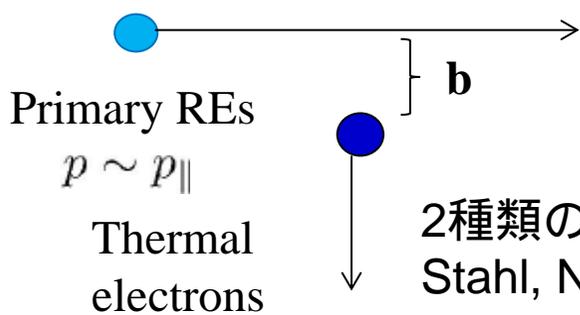
Electron Velocity

2次電子生成 (アバランチ現象)

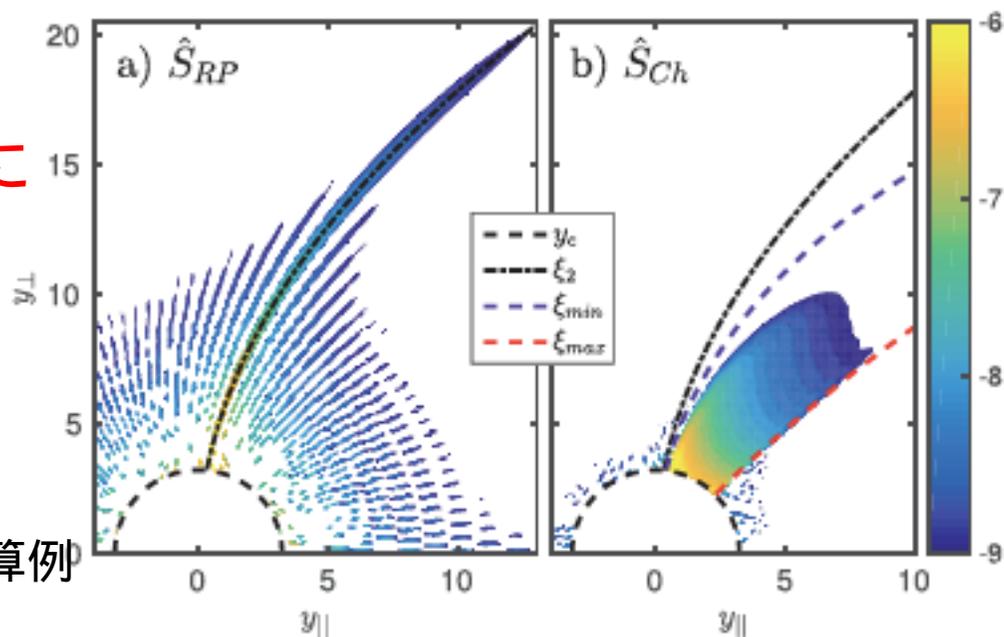
クーロン衝突 $\left\{ \begin{array}{l} \text{微小角散乱 (Fokker-Planck collisions)} \\ \text{大角度散乱 (Large-angle/close collision)} \end{array} \right.$

通常、大角度散乱の寄与は $1/\ln\Lambda$ ($\ln\Lambda=10-20$)だけ小さく無視されるが、逃走電子の問題では、相対論的電子(1次電子)と熱電子(2次電子)の1回の衝突で、2次電子が逃走電子になる確率が無視できない
[Sokolov, JETP Lett. 1979; Jayakumar, et al., Phys.Lett.A 1993]

2次電子生成によって
逃走電子電流が指数関数的に
増幅 (アバランチ現象)

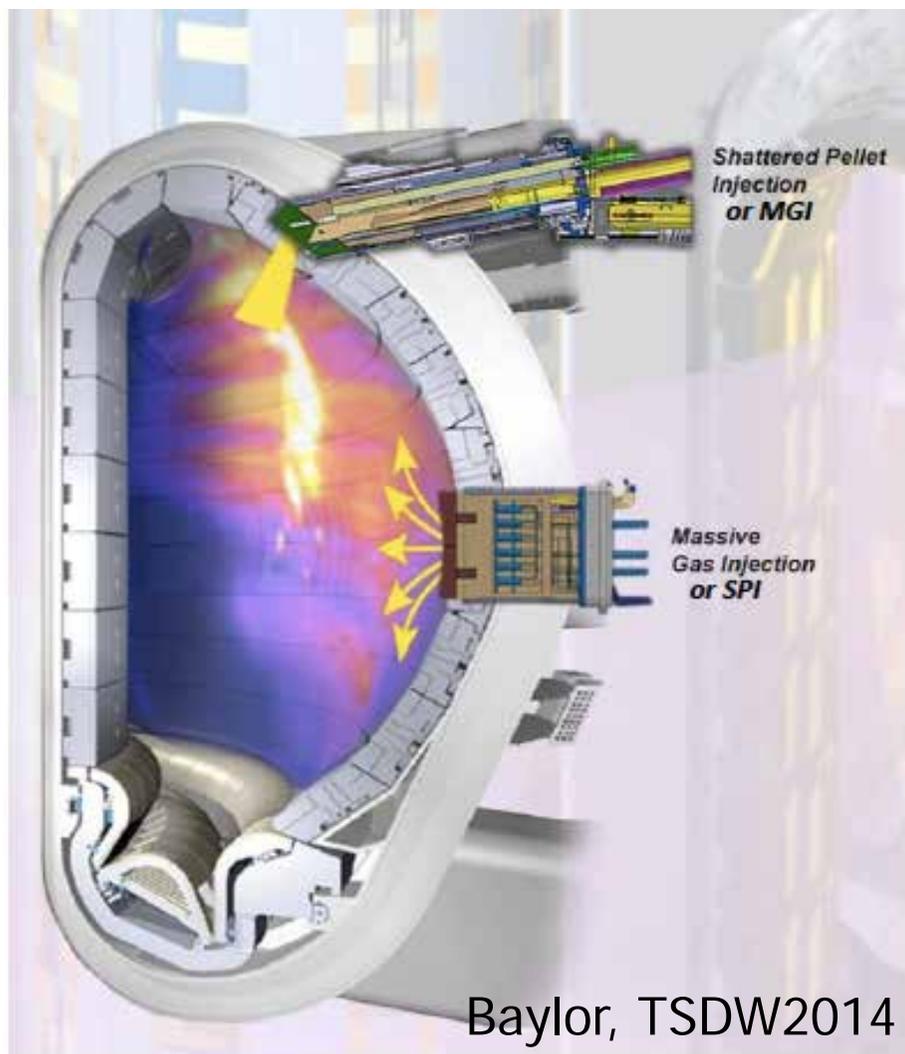


2種類モデルでの計算例
Stahl, NF2016



ディスラプション緩和と逃走電子

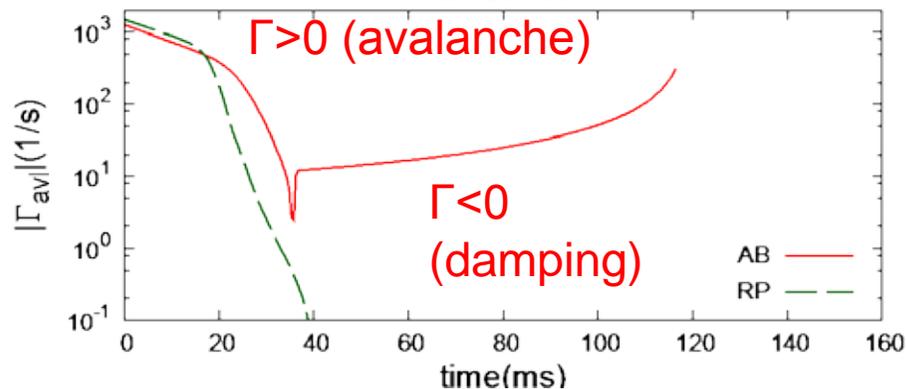
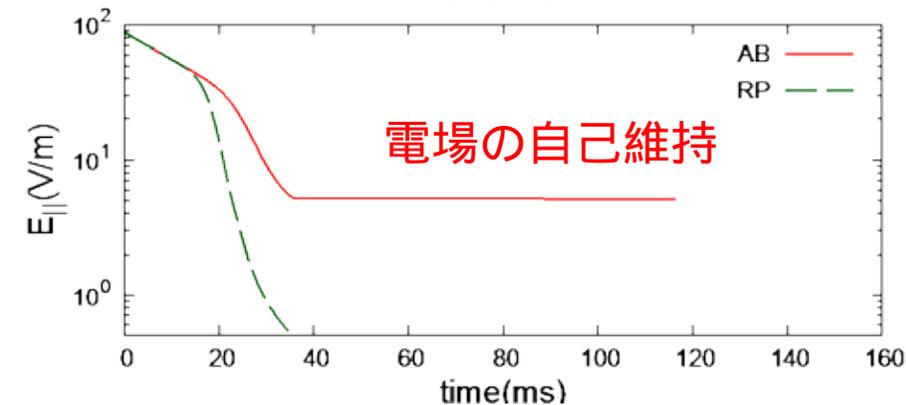
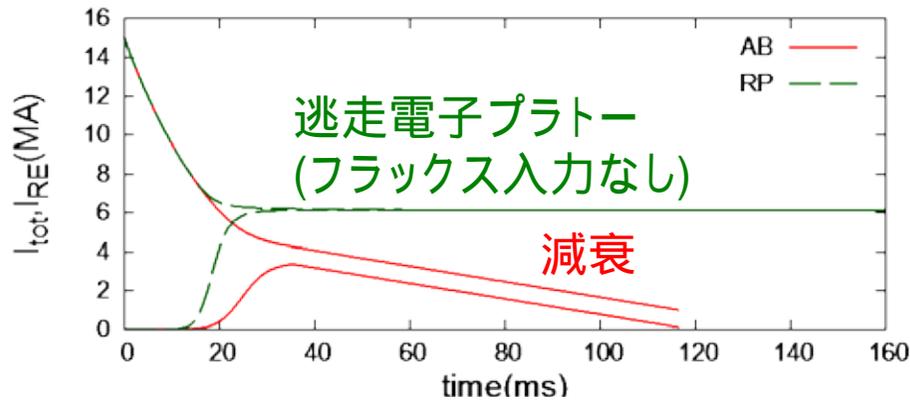
ITER以降の装置では熱負荷・電磁力負荷を軽減するディスラプション緩和の実装が必須 大量不純物入射($n_{Ar/Ne} \sim 10^{21}/m^3$ オーダー)



- ◆ 熱エネルギーを不純物放射によって散逸させ、金属ダイバータのmeltingを避ける
- ◆ プラズマ抵抗を上げることで磁気エネルギー(プラズマ電流)をジュール損失させ、うず電流やハロー電流を介した壁との結合を回避する
- ◆ 電流減衰が早くなるため、強い周回電圧がかかり逃走電子が発生しやすくなる

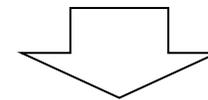
逃走電子緩和と統合したディスラプション緩和の最適化が未解決の問題

逃走電子発生に関する最近の理論的進展



◆ 従来の理論[Rosenbluth-Putvinski, NF1997]

- アバランチを引き起こす近接衝突について1次電子のエネルギーが十分大きいこと(質量 $\rightarrow\infty$)を仮定



◆ Near-critical field theory

[Aleynikov-Breizman, PRL2015]

- 1次電子と2次電子の間のエネルギー保存(有限質量)を考慮
- 本質的に異なる振る舞いが現れる
- ・ 逃走電子電流の減衰($\Gamma < 0$)
 - ・ 減衰中の電場の維持

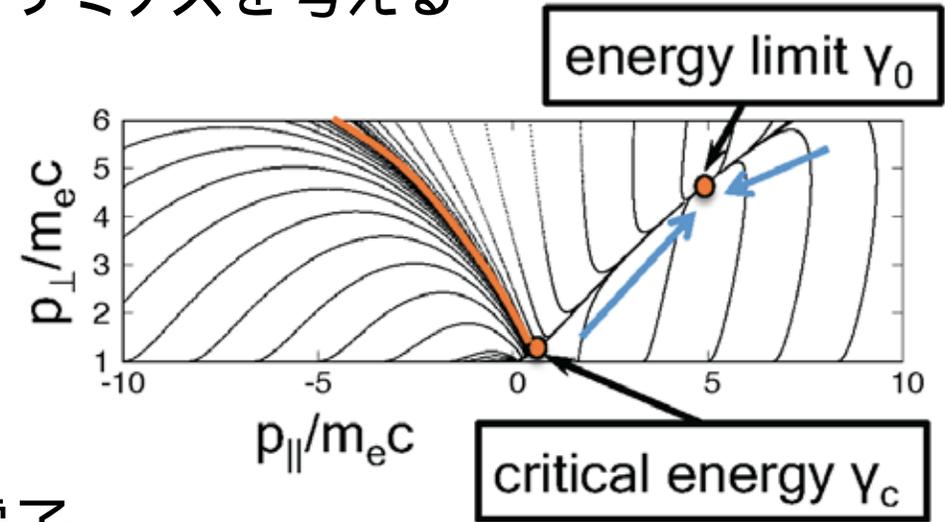
Near-critical field theory

◆ 運動量空間中の電子加速のダイナミクスを考える

・一旦、逃走電子になった粒子は
(主に)シンクロトロン放射による
dampingによって決まるenergy
limitに停留 [Martin-Solis, et al., PoP1998]

・従来モデルで無視されていた
1次電子エネルギーを含めて電子-電子
衝突の断面積を評価。

衝突後、1次電子と2次電子両方が γ_c より大きいという条件を適用



近接衝突により1次電子がエネルギーを失えば $\Gamma < 0$ (damping)の解が生じる

$$\frac{d\sigma_M(\epsilon; \gamma_1)}{d\epsilon} = 2\pi r_0^2 \frac{\gamma_1^2}{(\gamma_1 - 1)^2(\gamma_1 + 1)} \left[x^2 - 3x + \left(\frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1} \right)^2 (1 + x) \right]$$

$$\Gamma_{\text{avl}}(\gamma_1) \equiv \frac{d \log n_{\text{RE}}}{dt} = n_e v_1 \int_{\epsilon_c}^{1/2} \frac{d\sigma_M(\epsilon; \gamma_1)}{d\epsilon} d\epsilon \quad \epsilon = \frac{\gamma - 1}{\gamma_1 - 1} \quad x = \frac{1}{\epsilon(1 - \epsilon)}$$

逃走電子シミュレーションコードの開発

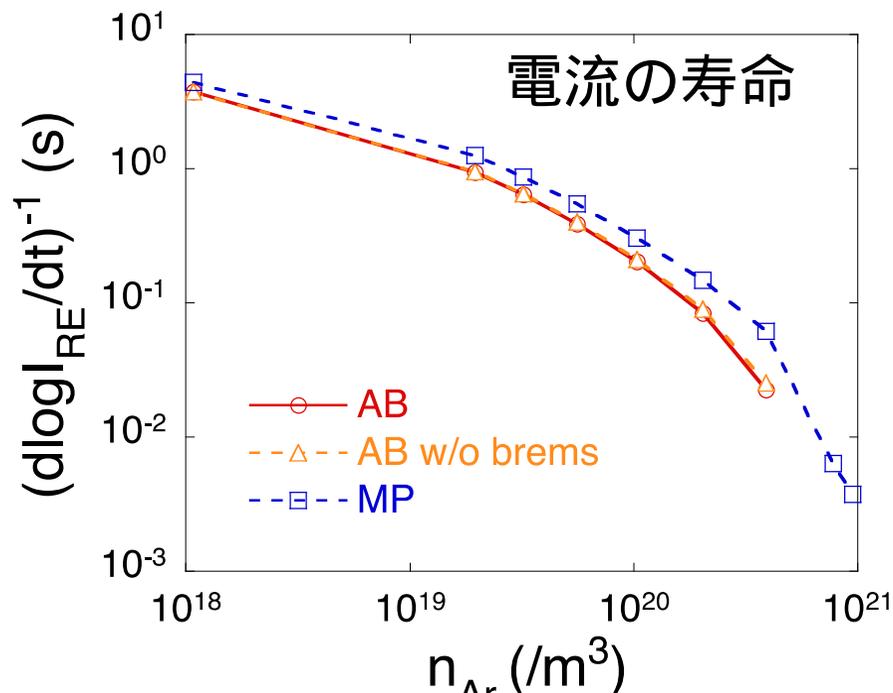
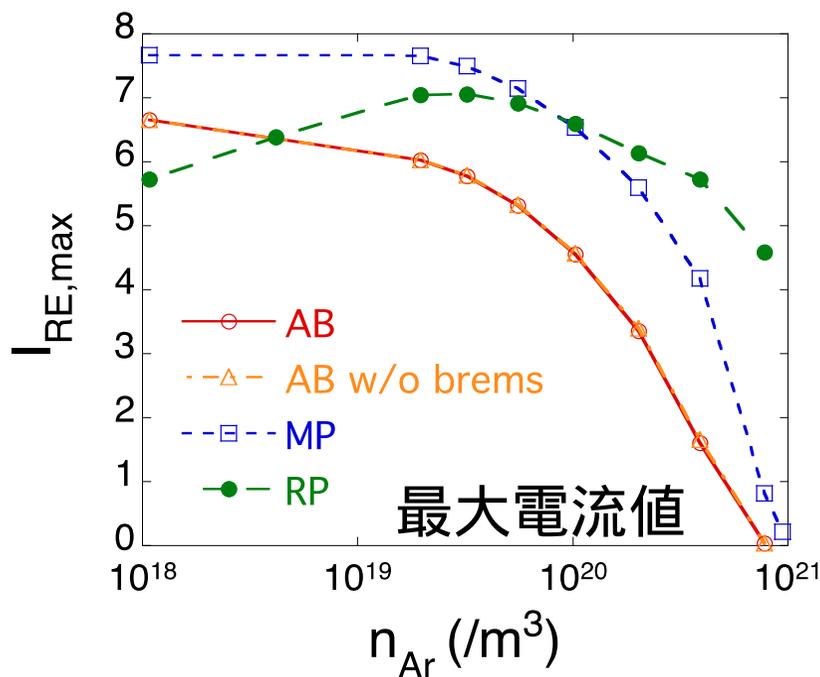
- ◆ アバランチ現象を解析するためNear-critical threshold theoryを採用した0次元(体積平均)コード (INDEX0D)を開発した。

[Matsuyama & Yagi, submitted]

- 不純物衝突、制動放射、速度空間拡散など様々な物理効果を評価可能

ITER 15 MA Ar-injectionに対するモデル間比較

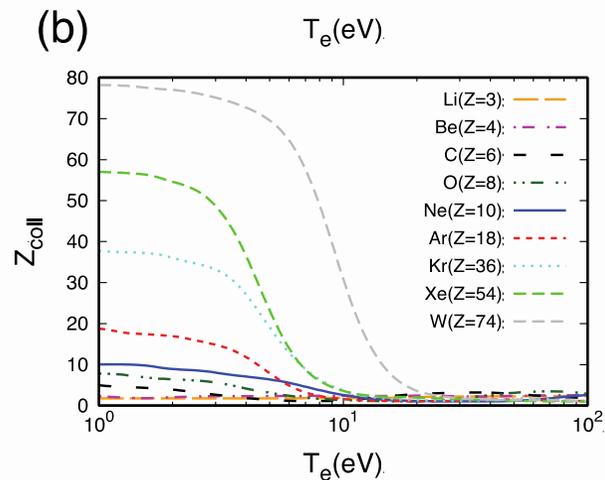
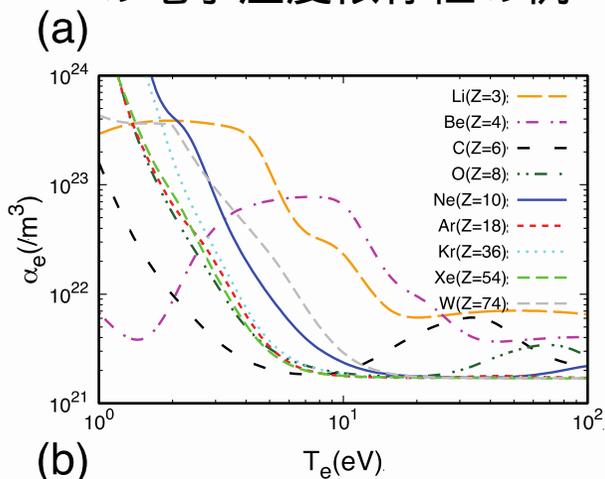
(従来モデル、速度空間拡散なし、制動放射なし、フルの計算)



コードの特徴: 不純物種データの実装

- Open ADASに基づく不純物データおよび**逃走電子-不完全電離不純物衝突モデル**を考慮

電子/イオン摩擦係数の電子温度依存性の例



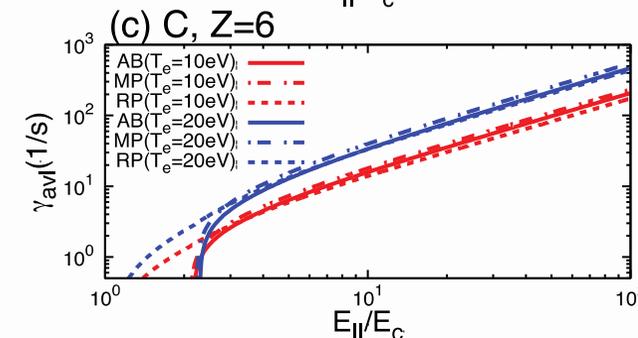
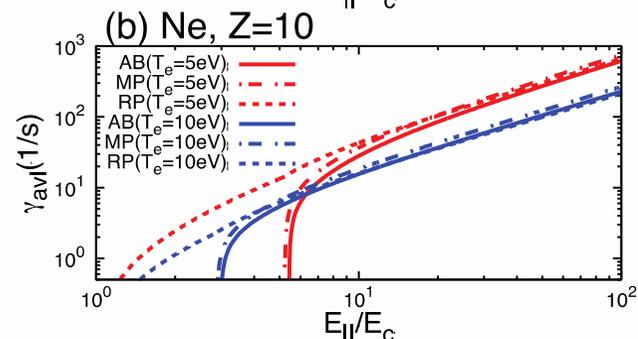
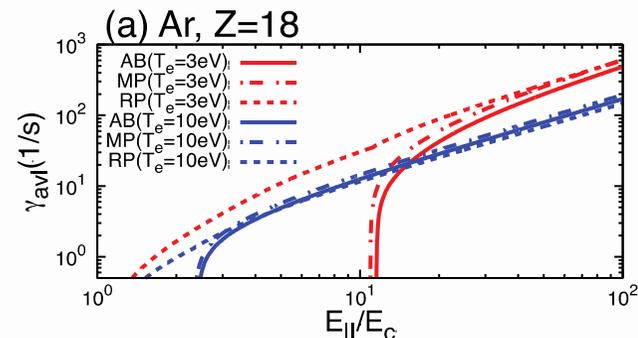
アバランチ生成率のモデルに実装



(不純物種を反映した逃走電子発生量評価が可能に)

$$F_e = -\frac{\alpha_e e^4 m_e \gamma (\gamma + 1)}{4\pi\epsilon_0^2 p^3}$$

$$F_i = -\frac{\alpha_e e^4 m_e Z_{\text{coll}} \gamma}{4\pi\epsilon_0^2 p^3}$$



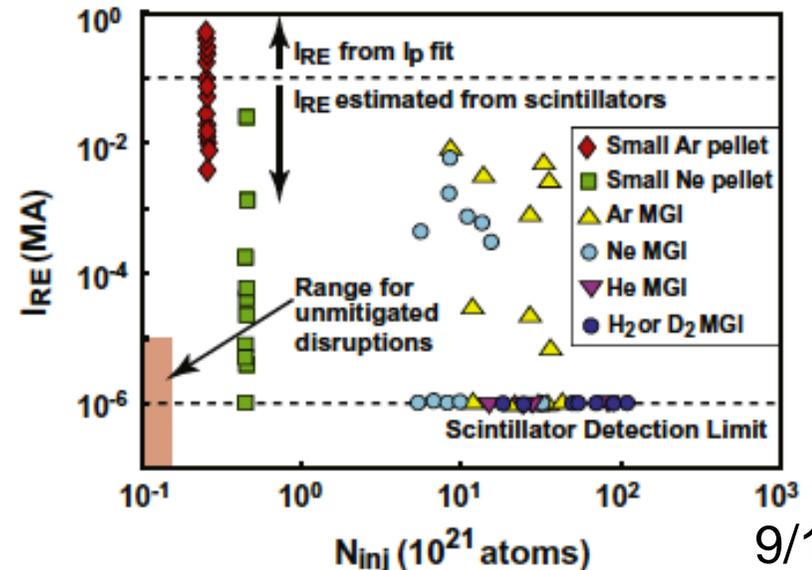
不純物種が逃走電子発生領域の決定に果たす役割

不純物(種類/密度)は、実験での逃走電子の発生条件と密接な関連を持つことが示唆

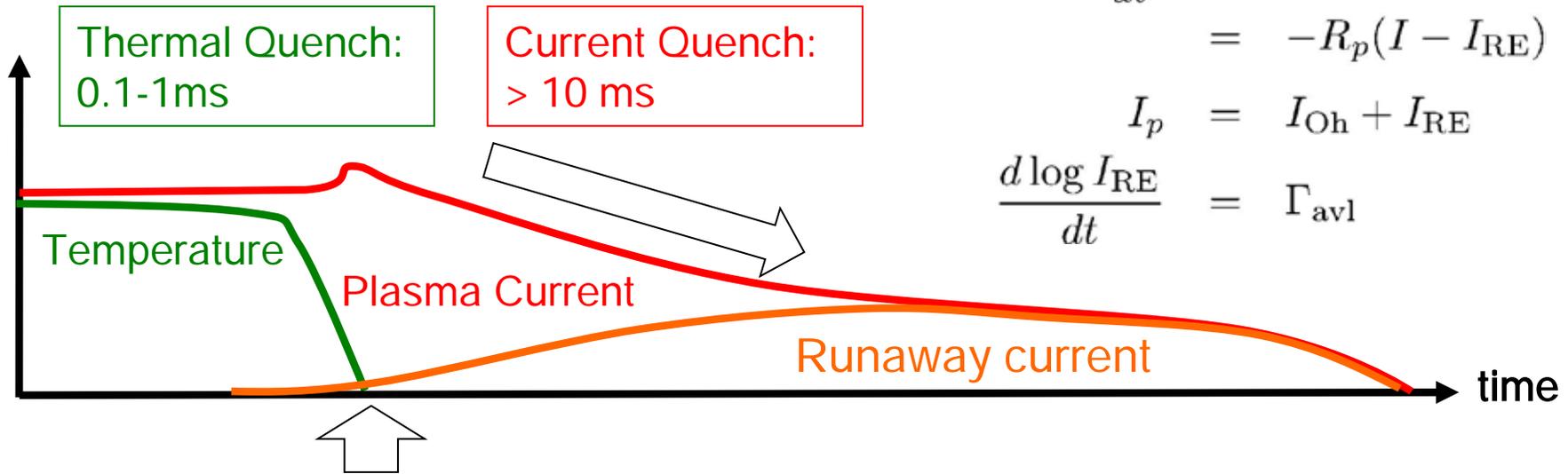
- ◆ JT-60U, DIII-D: キラーペレット(Ar, Ne)による逃走電子発生
[Kawano, JPFR2005; Hollmann, JNM2011]
- ◆ JET-C/JET-ILW: ILW (Be+W)では逃走電子発生が観測されていないがCarbon wallではMAオーダーの大電流逃走電子が観測[Reux, JNM2015]
- ◆ Ar, Ne等のMassive gas injectionによる逃走電子抑制
Hollmann, JNM2011
[Lehnen, et al., JNM2015]

不純物の影響を理解するため、低Z (Be,C)および希ガス(Ne,Ar)に対する逃走電子発生量を解析

条件: JT-60SA/JT-60U/JET規模
 $R=3\text{m}, a=1\text{m}, I_p=4\text{MA}/B=3\text{T}/\kappa=1.6$
 $n_H=1 \times 10^{20}/\text{m}^3 / I_{\text{seed}}=1\text{kA}$



不純物種依存性の解析手法



$$L \frac{dI_p}{dt} = -2\pi R_0 E_{\parallel}$$

$$= -R_p (I - I_{RE})$$

$$I_p = I_{Oh} + I_{RE}$$

$$\frac{d \log I_{RE}}{dt} = \Gamma_{avl}$$

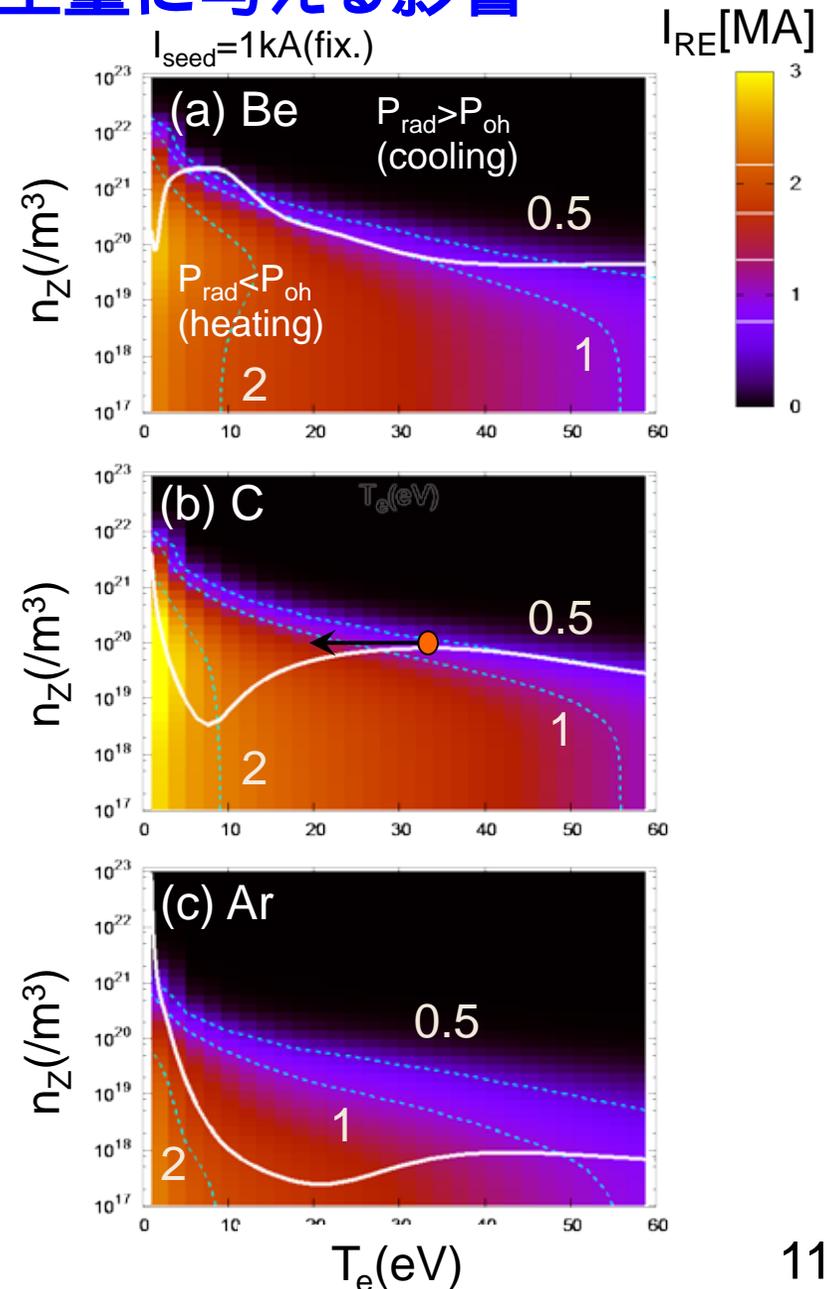
熱クエンチ後には不純物放射損失 P_{rad} とオーミック加熱の間にパワーバランスが成立していることを仮定し、電子温度と不純物密度を自己無撞着に決める [Whyte, et al., JNM2003]

初期に与えられた1次逃走電子電流に対し、電流減衰後、2次電子生成によって逃走電子電流がどれだけ増幅されるかを Near-critical threshold モデルによって評価

$$\text{アバランチゲイン: Gain} = \frac{I_{RE, \max}}{I_{RE}(t=0)}$$

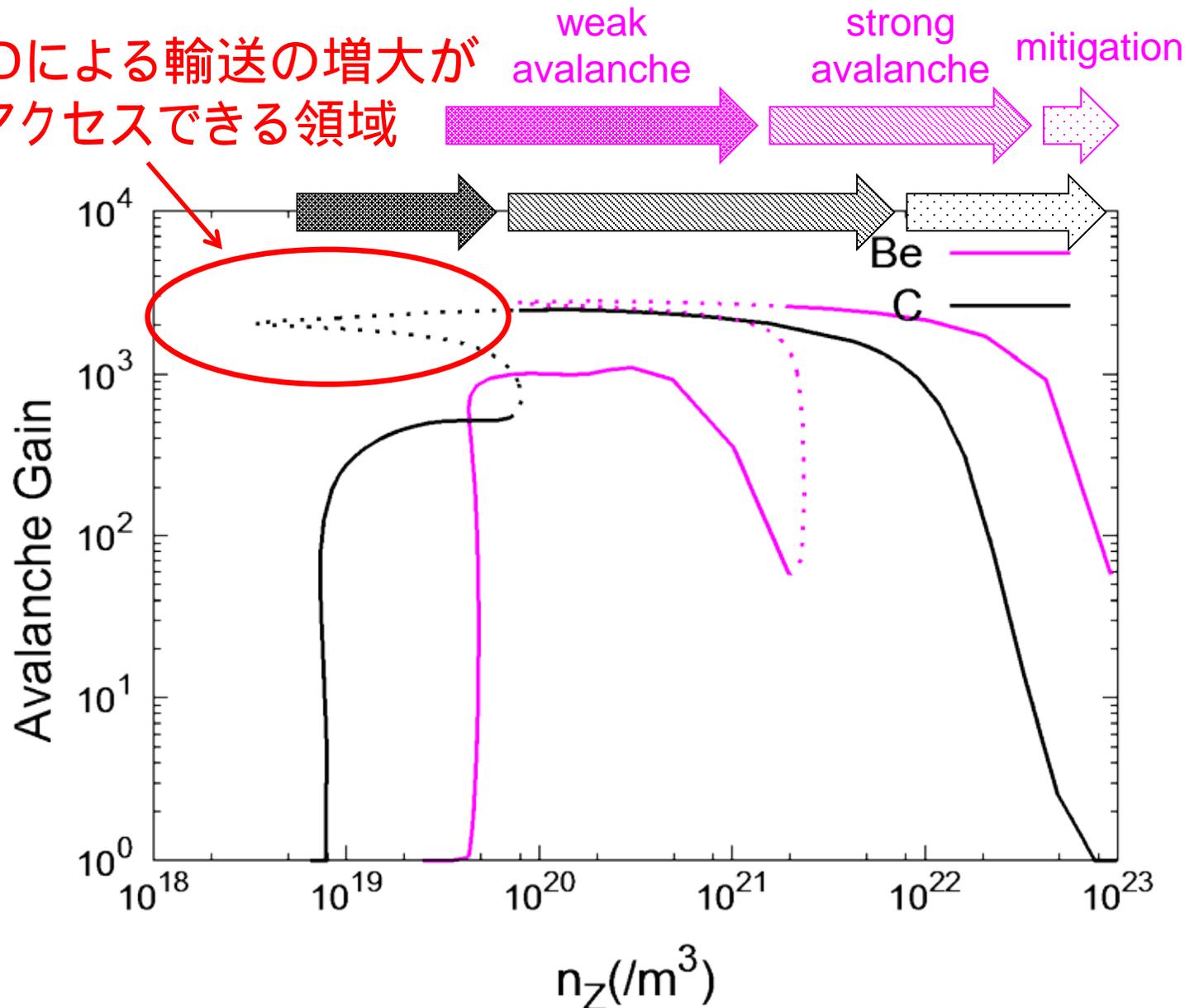
不純物量、電子温度が逃走電子発生量に与える影響

- ◆ 電子温度 vs 不純物密度の空間における逃走電子発生量の依存性
 - 電場が抵抗値に比例(電子温度および Z_{eff} を通じた依存性)
電場が強いほど高発生率
 - 高不純物密度(高電子密度[自由電子+束縛電子]および高Z原子による弾性散乱)によりfrictionが増加
逃走電子発生を抑制
- ◆ $P_{\text{oh}}=P_{\text{rad}}$ の平衡曲線は与えられた不純物密度に対して三重根をもつ
“典型的に”アクセスしやすいのは高温側安定根。

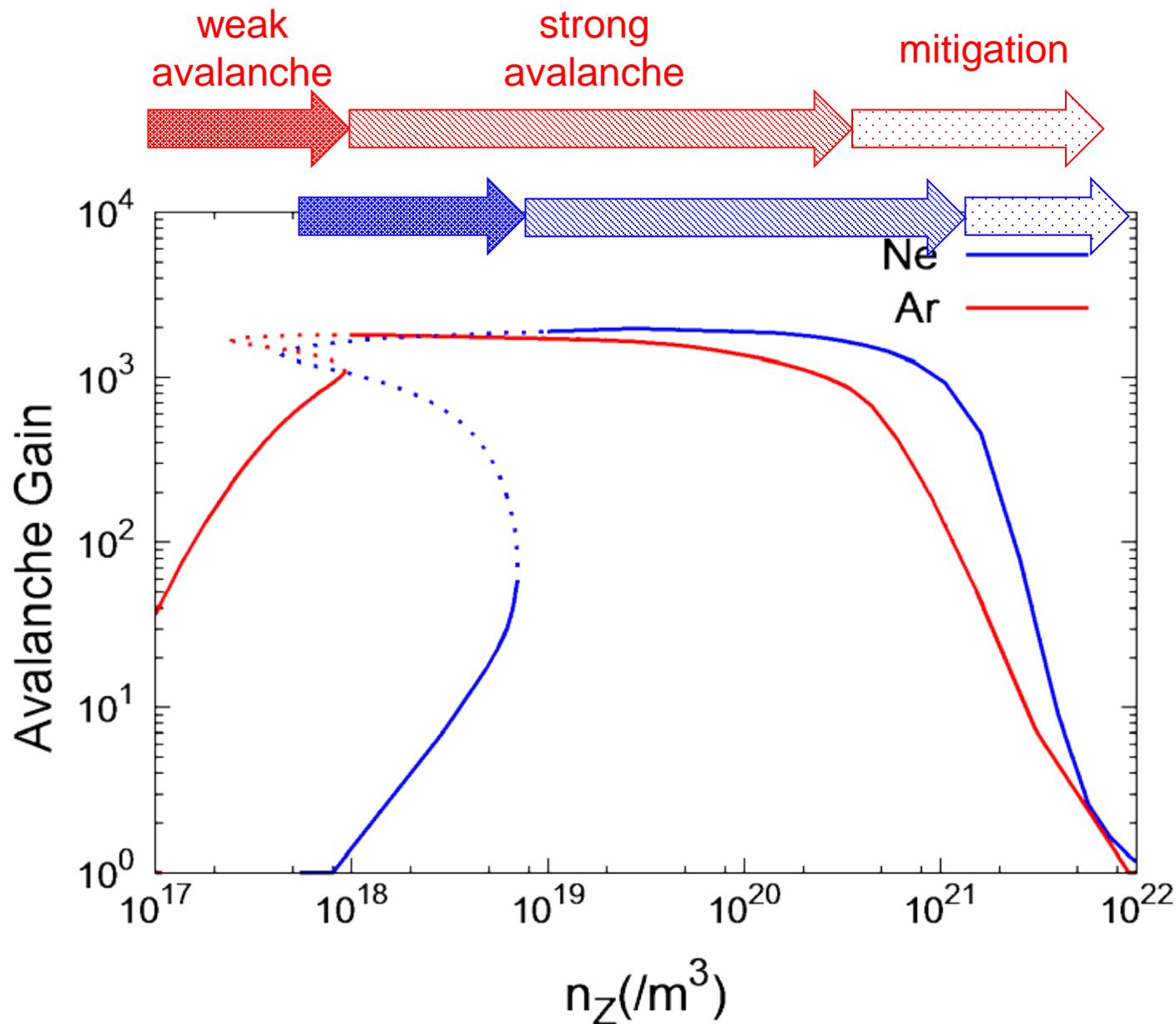


2次電子生成量の不純物原子密度依存性(Be/C)

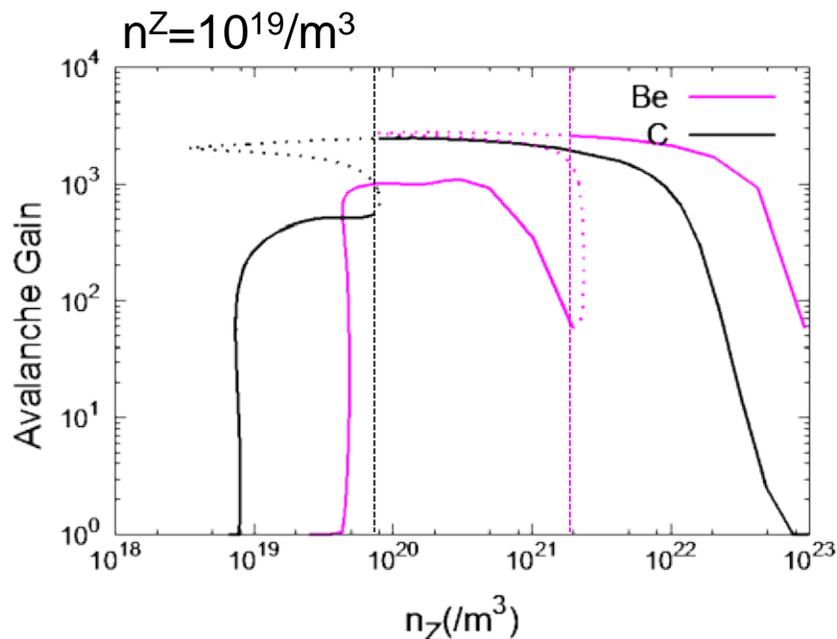
cf.) MHDによる輸送の増大があればアクセスできる領域



2次電子生成量の不純物原子密度依存性(Ne/Ar)

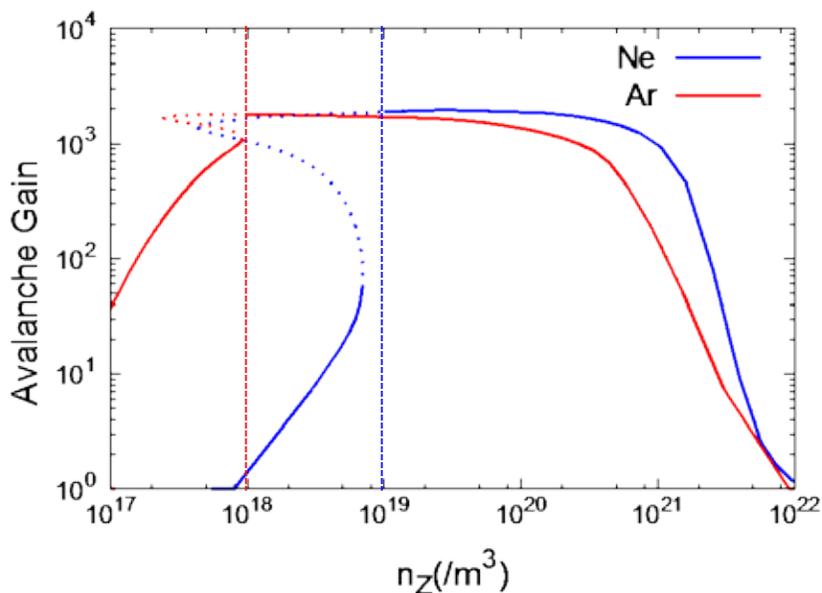


2次電子生成量に対する不純物種の影響



◆ 弱いアバランチから強いアバランチ領域に移る閾値

不純物種	閾値密度(/m ³)
Be	2×10^{21}
C	1×10^{20}
Ne	1×10^{19}
Ar	1×10^{18}



◆ アバランチゲインが減少に転じる不純物密度

不純物種	閾値密度(/m ³)
Be	5×10^{22}
C	1×10^{22}
Ne	1×10^{21}
Ar	5×10^{20}

まとめ

- ◆ ITERに向け、ディスラプション時の逃走電子抑制が重要な研究課題となっている。本研究では、near-critical threshold theoryに基づく逃走電子解析コード(INDEX0D)を開発し、重要なファクターとして不純物がアバランチ現象に与える影響を調べている。
 - コードの特徴: 不純物衝突、制動放射、速度空間拡散など様々な物理効果を評価可能。Open ADASに基づく不純物データおよび電子-不完全電離不純物の衝突モデルを考慮
- ◆ 不純物の放射損失特性に由来して、不純物原子密度に関し、(1) 弱いアバランチ、(2) 強いアバランチ、(3) 逃走電子緩和、の3つの領域が現れること、領域を分ける閾値密度は不純物種に依存して決まることが明らかにされた。今後、重水素との混合ガスの影響などを調べる予定である。
- ◆ QSTでは今回紹介したような簡易モデリングに並行して、非線形MHDシミュレーションや粒子シミュレーションなどの第一原理的なアプローチでのディスラプション・逃走電子発生現象の研究を進めている。[ETC-Rel code: Matsuyama, NF2014; EXTREM code: Matsuyama, submitted to NF]15/15