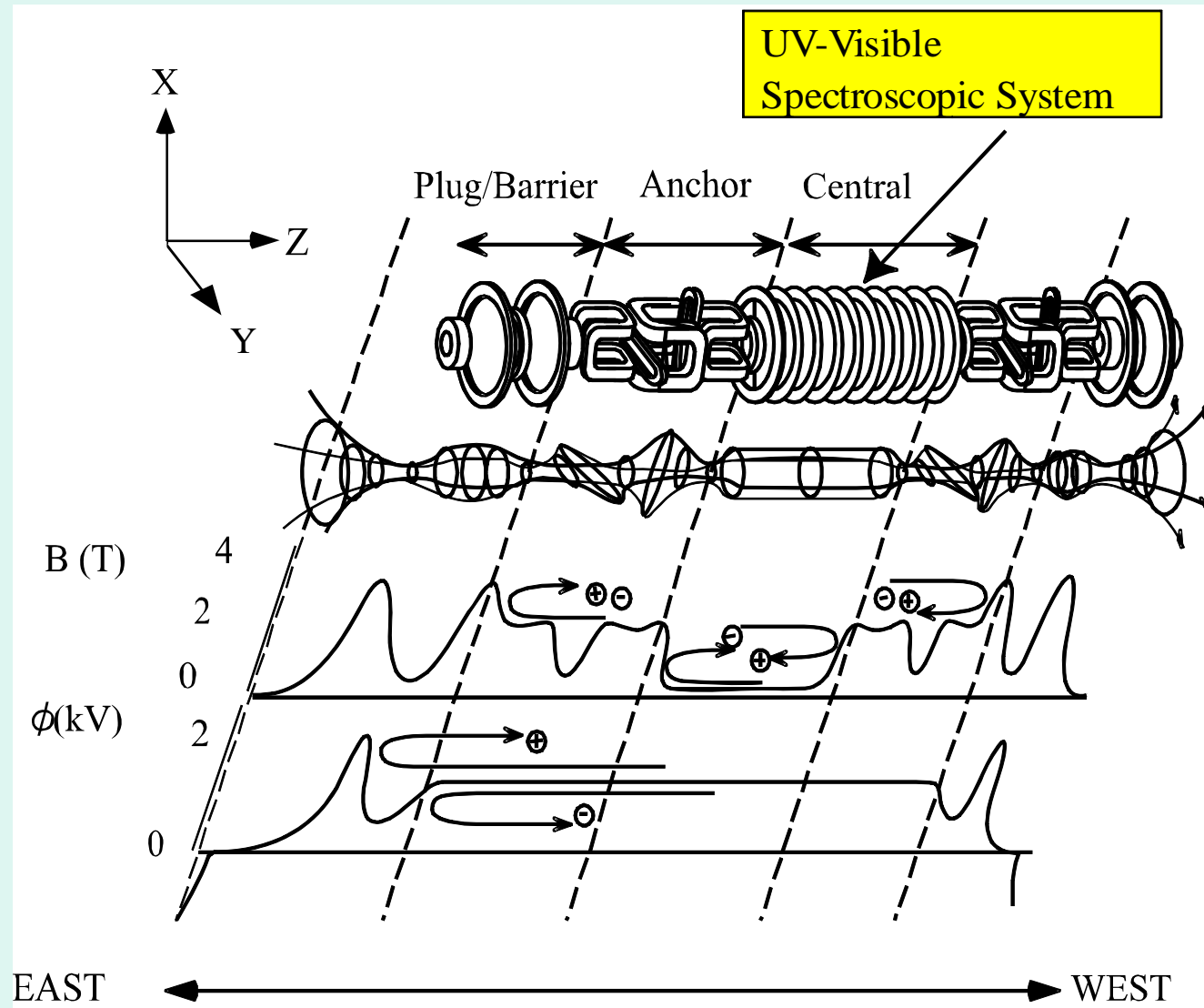


第10回若手科学者によるプラズマ研究会「ITERに向けたプラズマ科学の新展開」
原子力機構那珂研, 平成19年3月14～16日

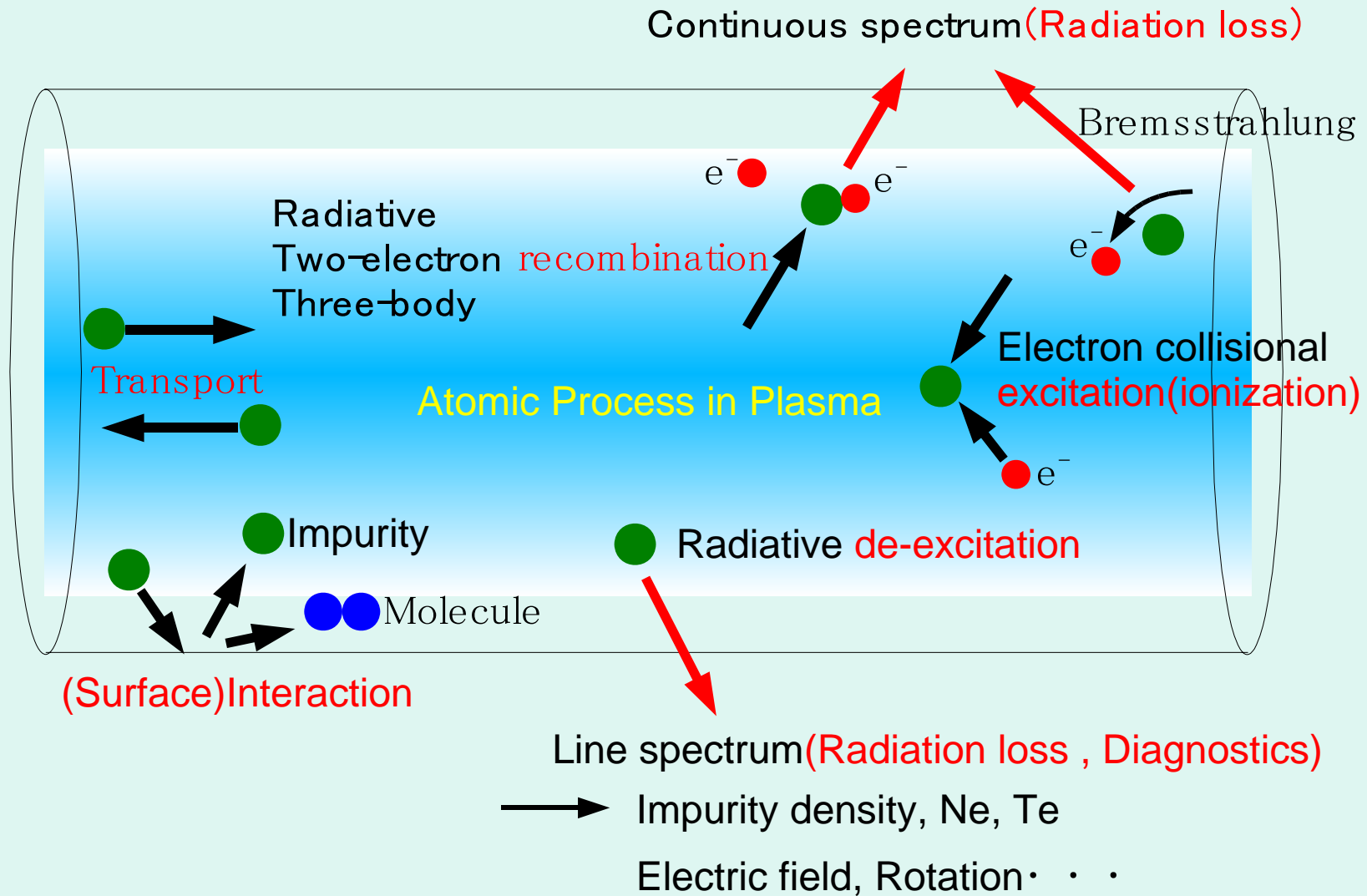
GAMMA 10における分光計測と 衝突・輻射モデルを用いた不純物診断

小林 貴之, 真珠 健
筑波大学プラズマ研究センター

GAMMA 10



Spectroscopy



GAMMA 10における紫外・可視分光計測

既存計測システム

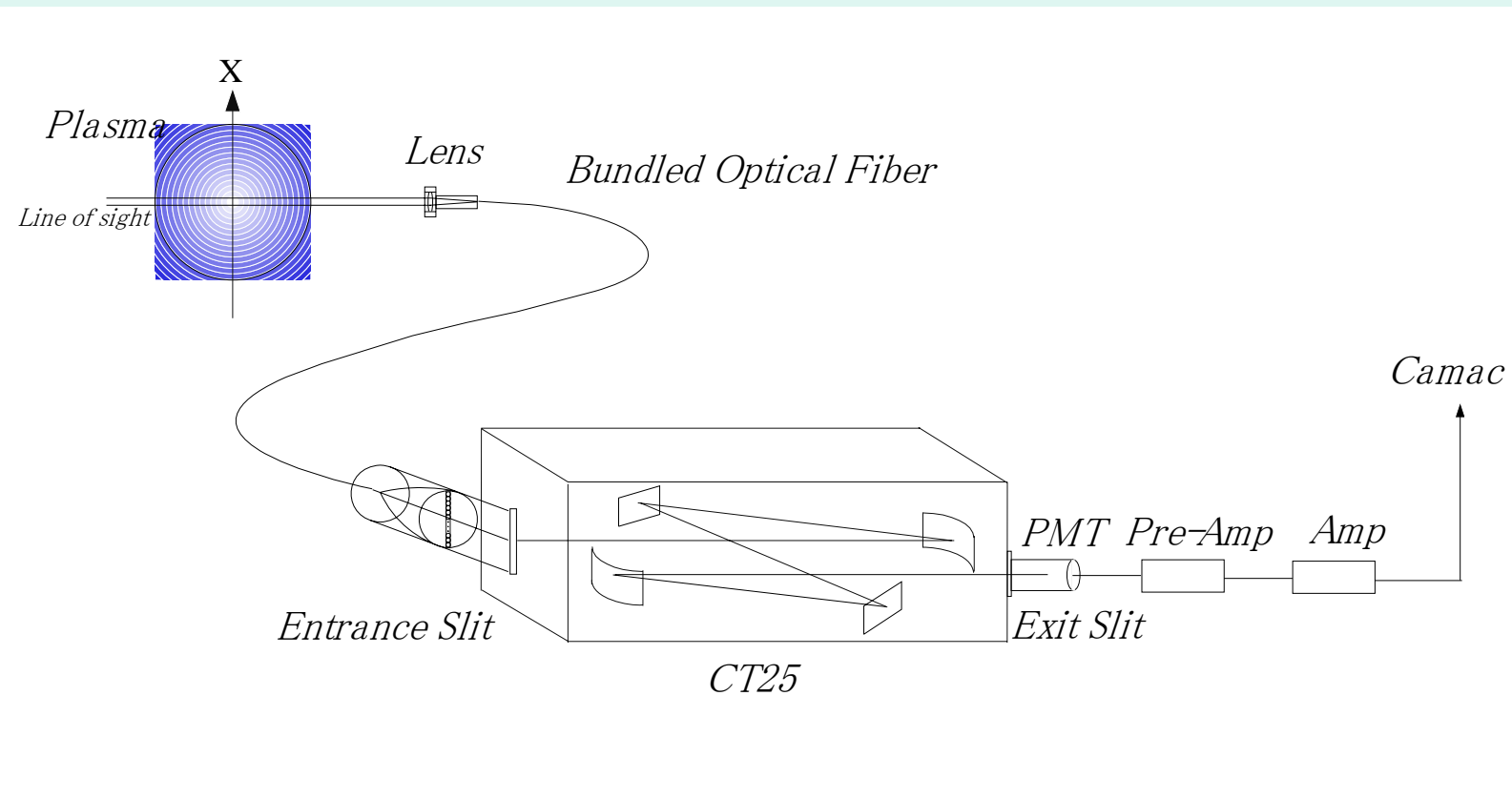
CT25 スペクトル強度 **高時間分解** 計測
(PMT and CAMAC module, 1ch)
→ 不純物モニタ, 時間変化

CT100 スペクトルプロファイル **空間分布**, **高波長分解** 計測
(40ch optical fiber array, CCD, 2400 grooves/mm)
→ 強度(原子・イオン密度), ドップラーシフト(電場), ドップラー広がり(温度)分布

新規計測システム

多チャンネル **広波長域** 同時計測
(multi-channel CCD spectrometer × 2 (UV and Visible), 1ch)
→ 複数スペクトル同時計測
定常不純物モニタ
スペクトルのエネルギー分布 (電離進行、再結合)
線スペクトル強度比 (電子密度、電子温度)
線スペクトル強度 (原子・イオン密度)

CT25



觀測可能波長領域

200 – 700 nm

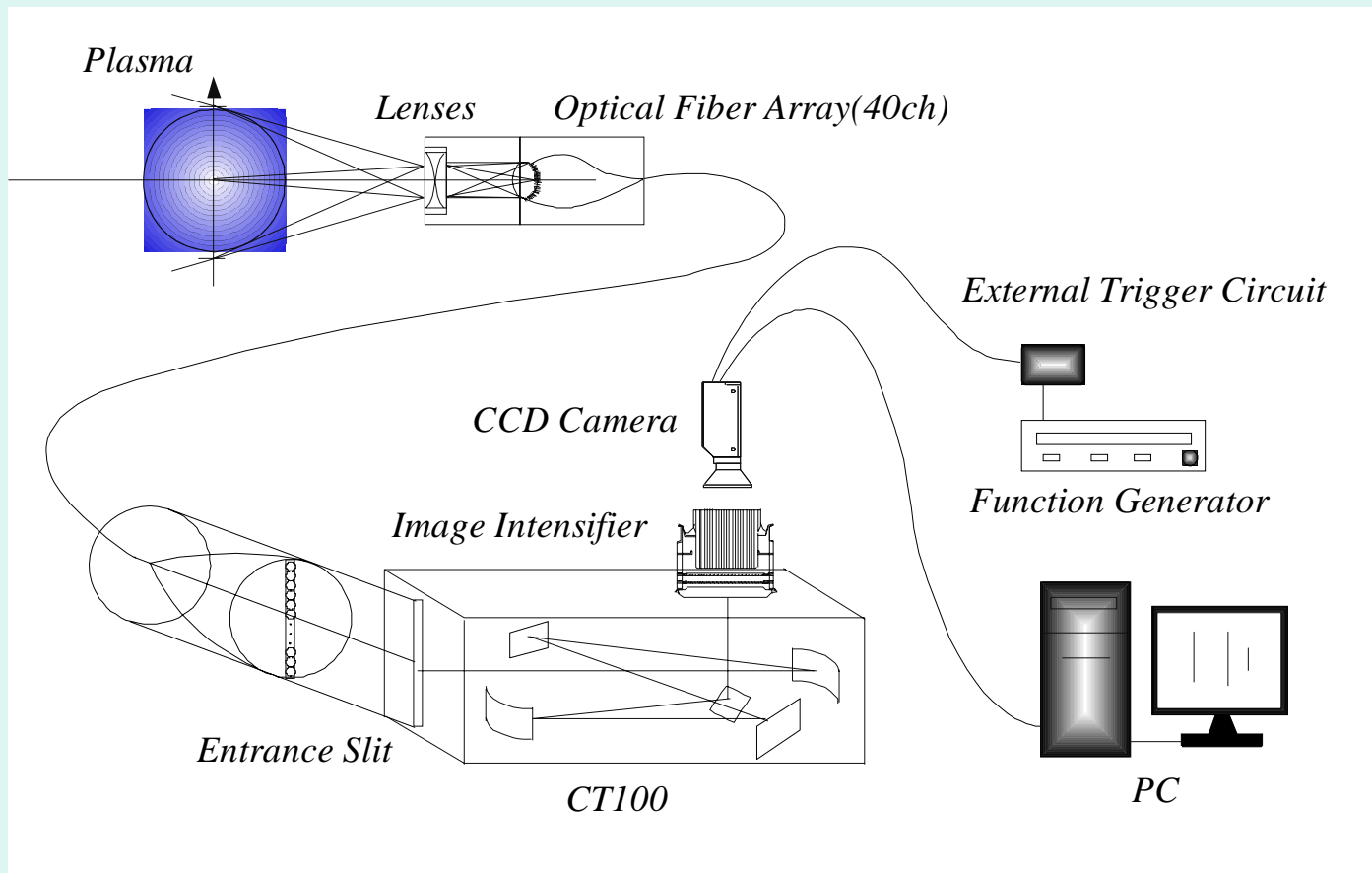
波長分解能

1.4 nm @365nm

時間分解能

20 ms

CT100



観測領域

観測可能波長領域

波長分解能(分散)

時間分解能

$X = -20 \text{ cm} \sim +20 \text{ cm}$ (1 cm/ch)

200 – 670 nm (5 nm/frame)

0.03 nm (0.006 nm/pixel) @312nm

20 ms

多チャンネル分光計測システムの設計

波長分解能(FWHM)

高波長分解能分光器(CT100)で

GAMMA 10プラズマを計測



主要なスペクトルは0.5 nm程度で分離可能

分光レンジ : 300 nm

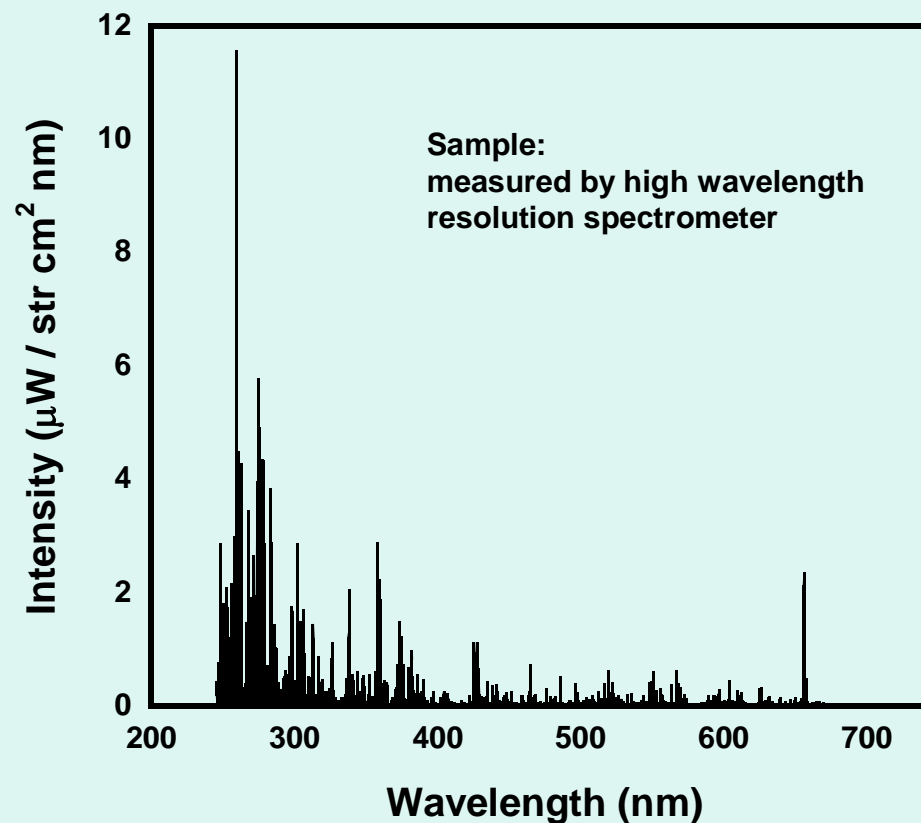
CCDピクセル数 : 2048 pixel

スリット幅 : 5 mm

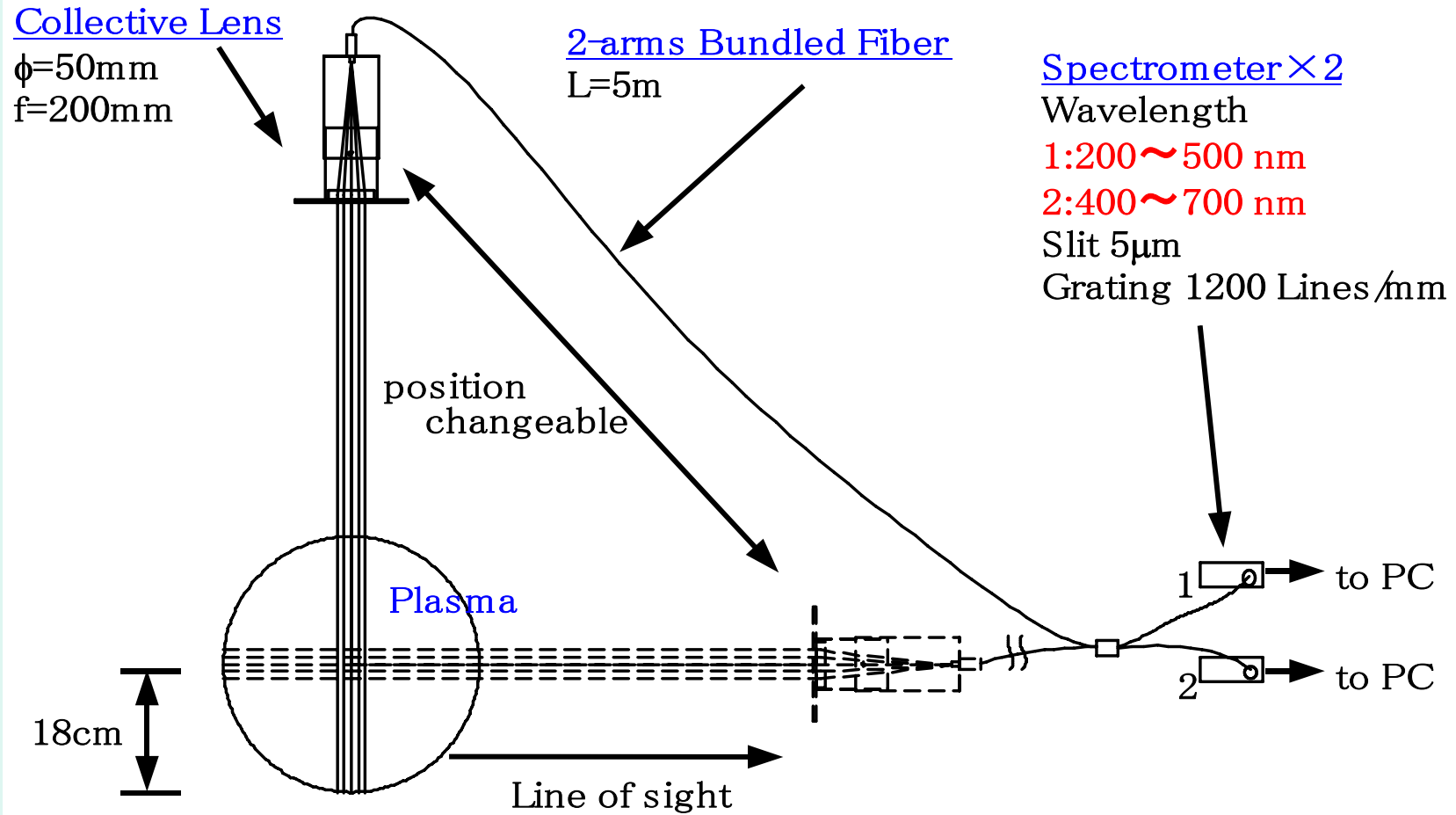
$FWHM = (300/2048) \times 3 = 0.42 \text{ nm}$

感度

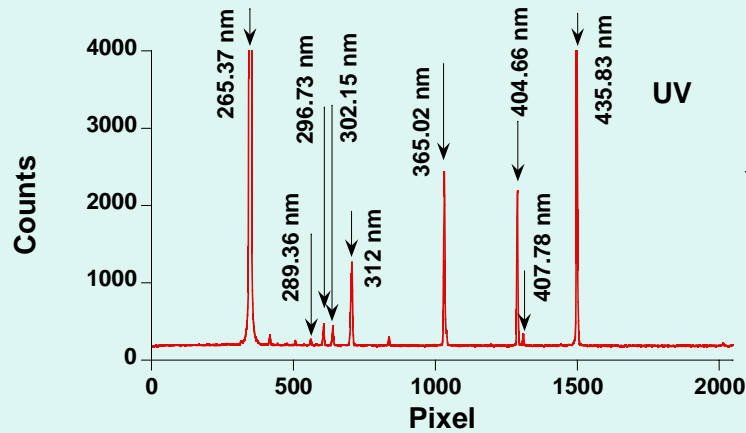
分光器のサンプルを取り寄せ、GAMMA 10プラズマに適用する事で十分であることを確認



多チャンネル分光計測システム



多チャンネル分光計測システムの波長分解能と感度校正



Spectrometer 1 (200-500 nm)

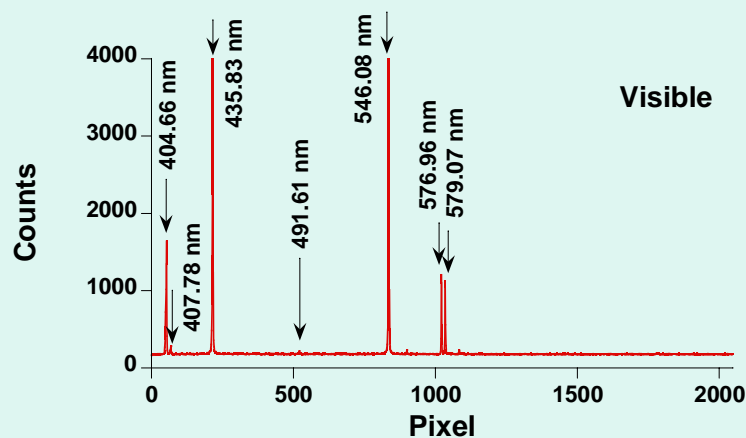
波長分解能 (FWHM) \rightarrow 0.792 nm (@ 365 nm)

波長分散 \rightarrow 0.154 nm/pixel (@ 365 nm)

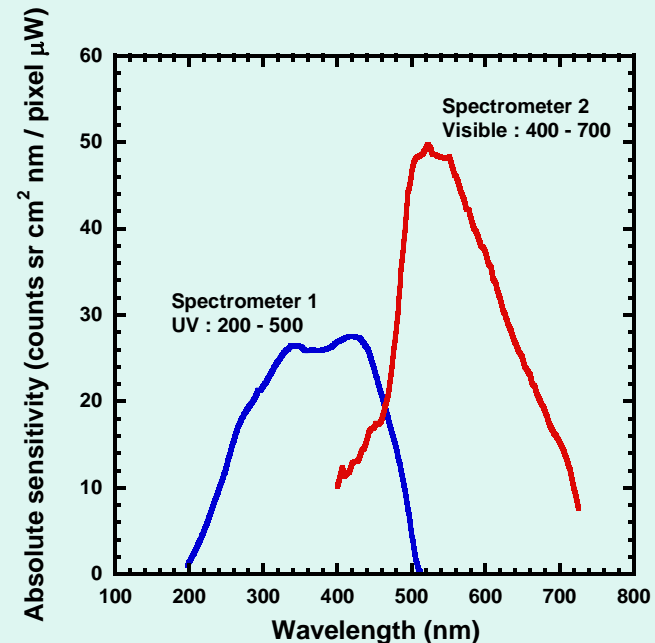
Spectrometer 2 (400-700 nm)

波長分解能 (FWHM) \rightarrow 0.467 nm (@ 546 nm)

波長分散 \rightarrow 0.183 nm/pixel (@ 546 nm)



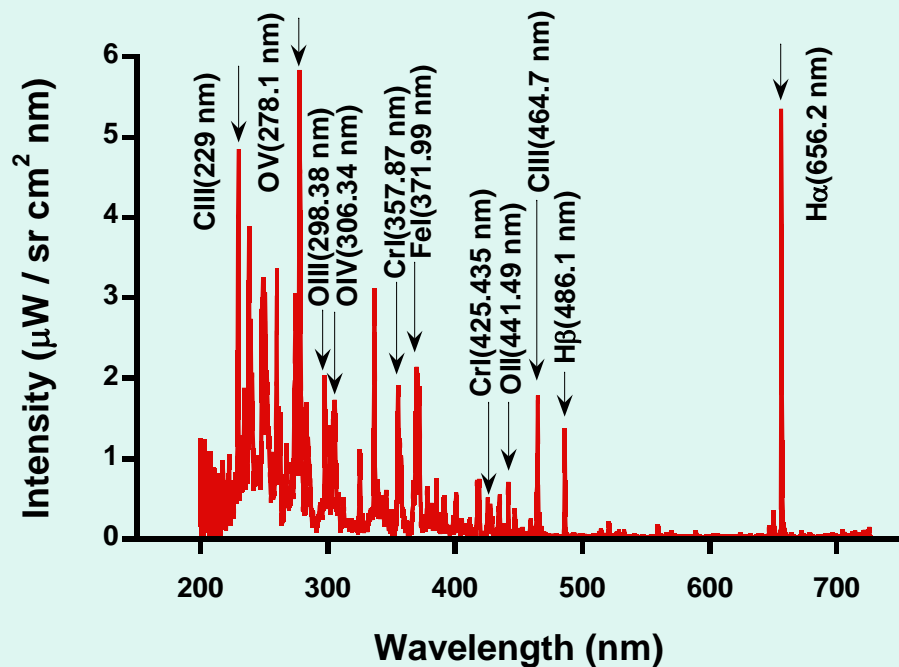
波長校正用水銀ランプからの発光



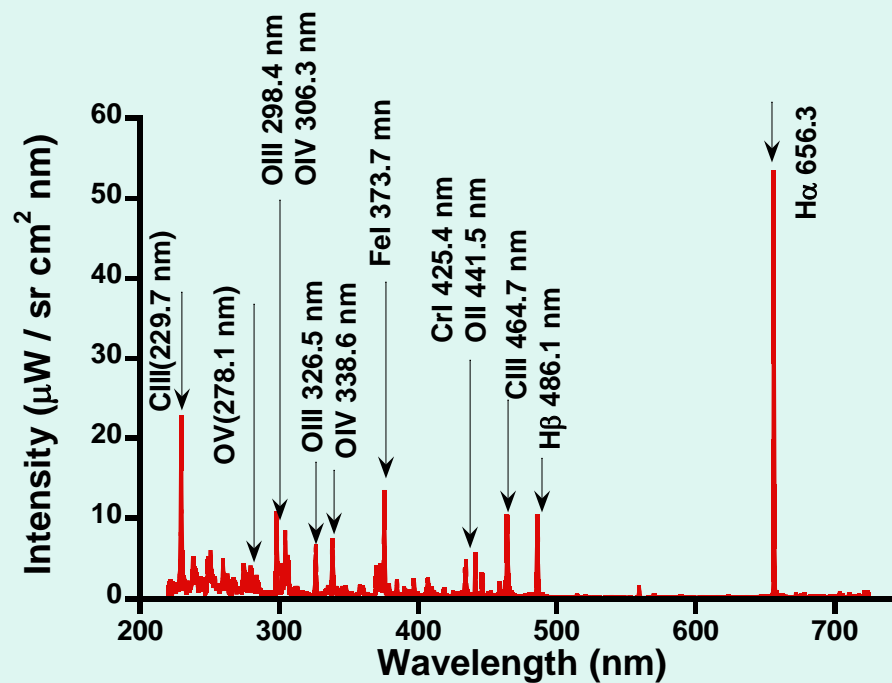
絶対感度校正値

プラズマから放射される線スペクトルの同定

高温イオンモード時の放射スペクトル
($n_e=2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $T_e=80 \text{ eV}$)



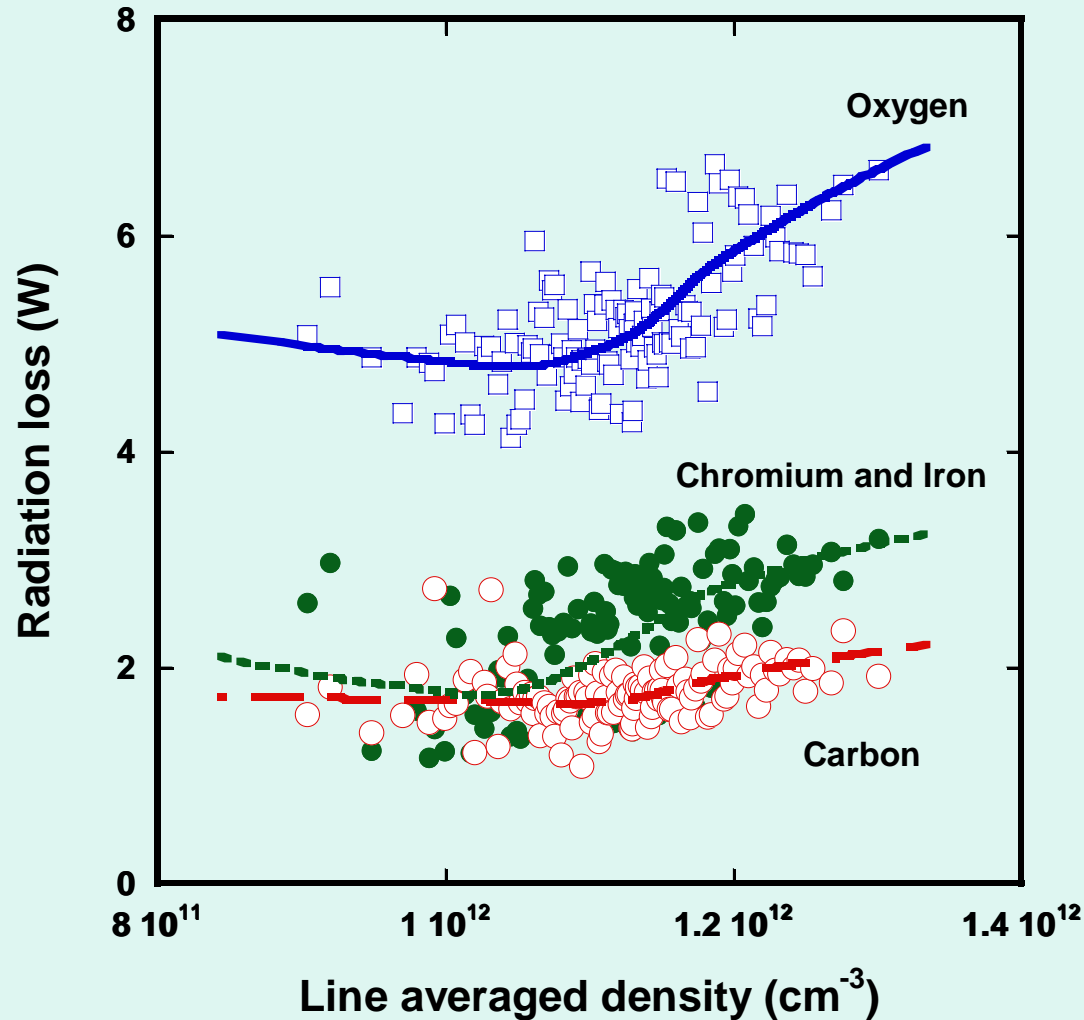
高密度モード時の放射スペクトル
($n_e=6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $T_e=40 \text{ eV}$)



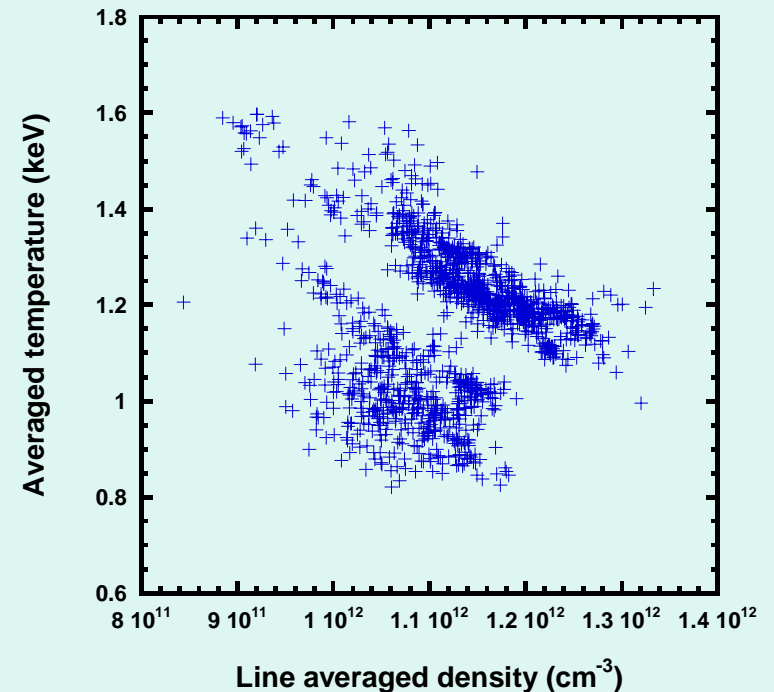
GAMMA 10プラズマ中で主に発光する酸素イオン、炭素イオン、鉄原子、クロム原子からの発光を同定した

新規分光計測システムの分解能、感度ともにGAMMA 10プラズマに対し十分である事を確認した

セントラル部放射損失量の平均密度依存性



電子密度上昇の効果によって放射損失が大きくなっている



Averaged electron density and averaged temperature

$$T_{av} = \frac{B_0}{\mu_0 e \pi} \frac{dmcc}{n_{av} a^2}, n_{av} = \frac{nlcc}{2a}$$

セントラル部放射損失量の平均温度依存性

炭素イオンからの発光強度

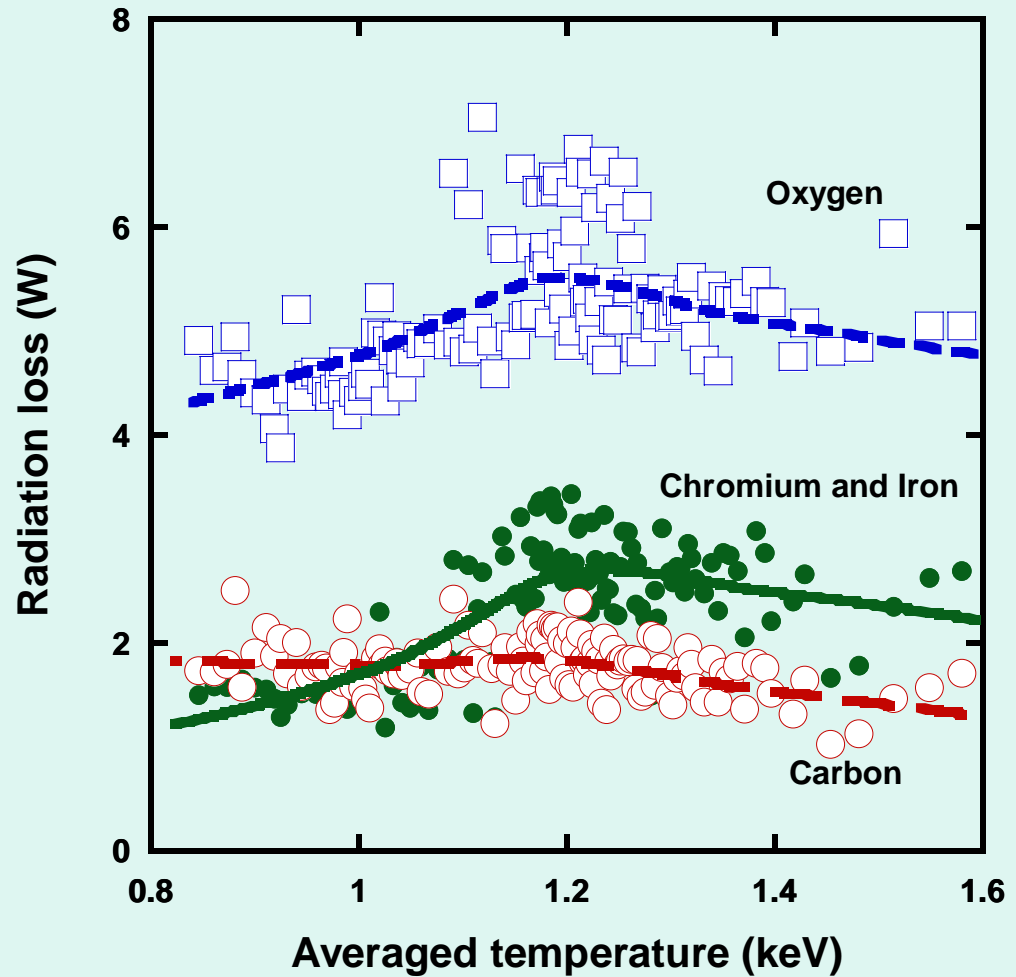
→ 単調に減少

酸素イオン、クロム原子、

鉄原子からの発光

→ 発光強度が $T_{av}=1.2\text{keV}$

あたりでピークを持っている



酸素イオンの平均温度依存性

OII、OIII、OIVからの発光強度

→減少傾向

OVからの発光強度

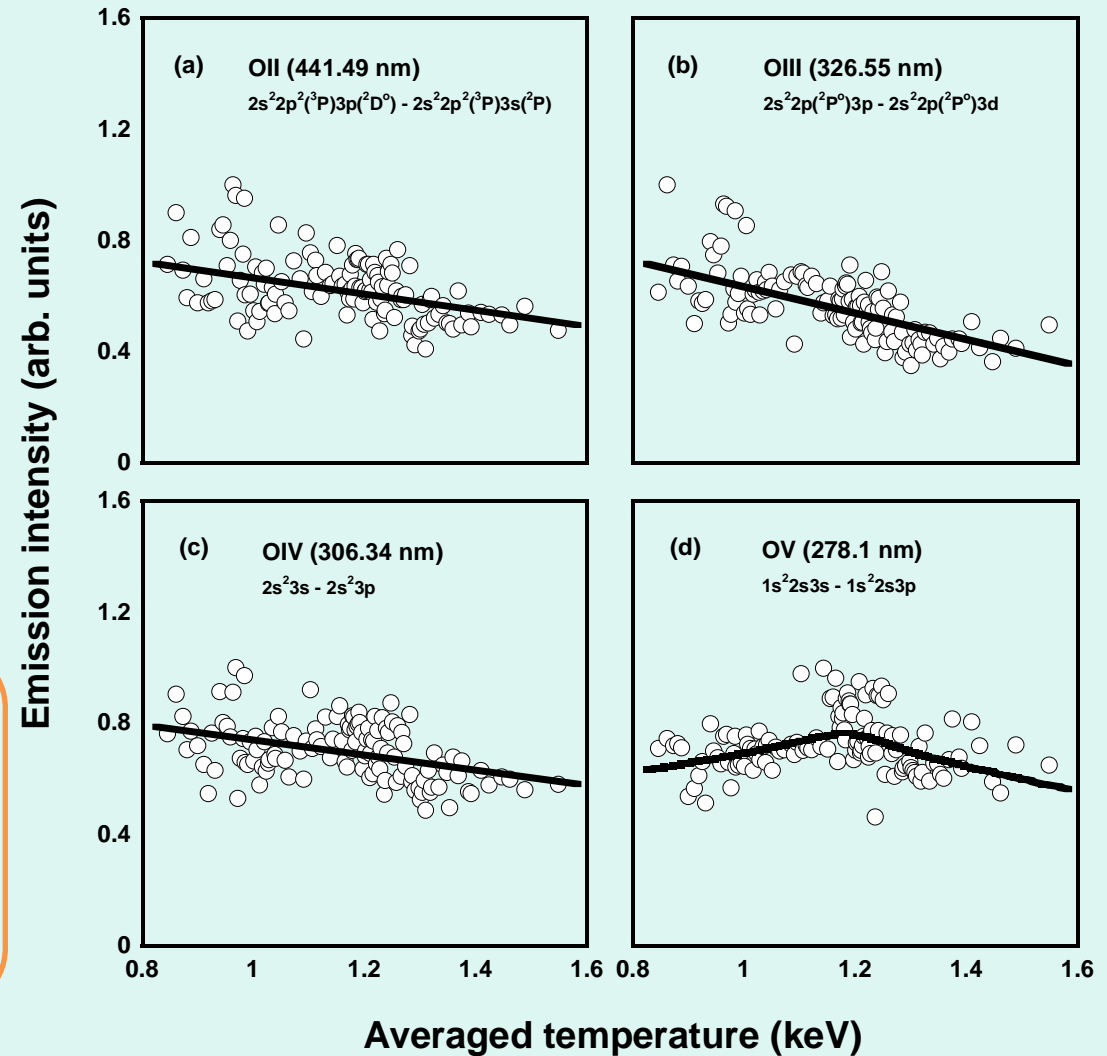
→ピークをもつ



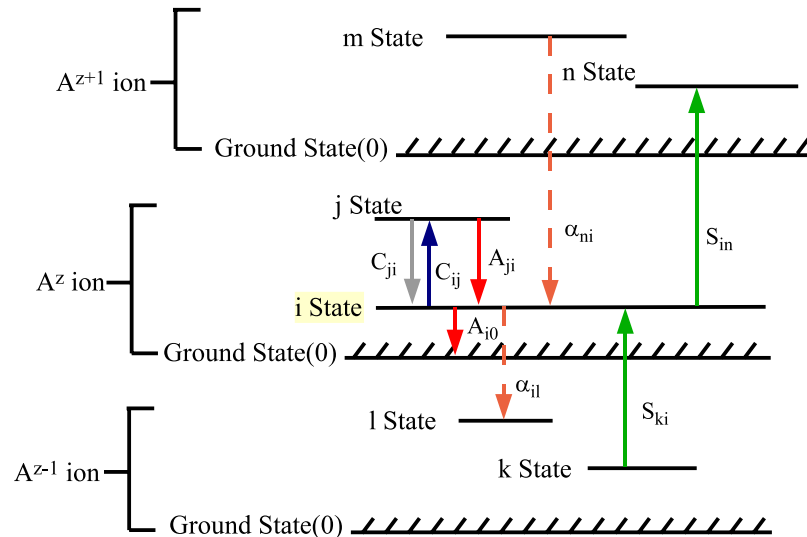
直接電子加熱を行わないときの
電子温度は約80 eV.

$T_{av}=1.2$ keVを境に電離が進行

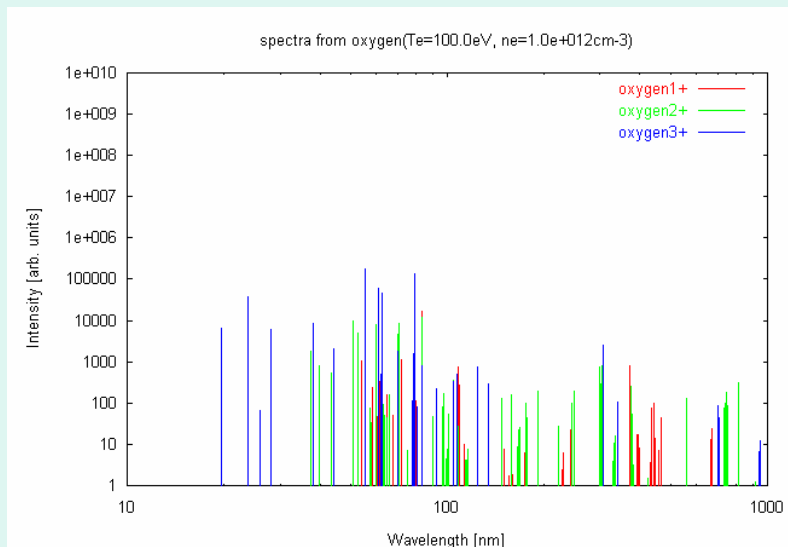
している可能性



衝突・輻射モデル



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n_z(p) = & \left(\sum_{q \neq p} C_z(q, p) n_e n_z(q) + \sum_{q > p} A_z(q, p) n_z(q) \right) \\ & - \left(\sum_{q \neq p} C_z(p, q) n_e + \sum_{p > q} A_z(p, q) \right) n_z(p) \\ & + \sum_l S_{z-1}(l, p) n_e n_{z-1}(l) \\ & - \sum_k S_z(p, k) n_e n_z(p) \\ & + \sum_k (\alpha'_{z+1}(k, p) n_e + \alpha^r_{z+1}(k, p) + \alpha^d_{z+1}(k, p)) n_e n_{z+1}(k) \\ & - \sum_l (\alpha'_z(p, l) n_e + \alpha^r_z(p, l) + \alpha^d_z(p, l)) n_e n_z(p) \end{aligned}$$



NIFSとの共同研究により、低電離酸素のCR-modelを構築し、GAMMA 10の酸素イオン分布を解析できるようになった。

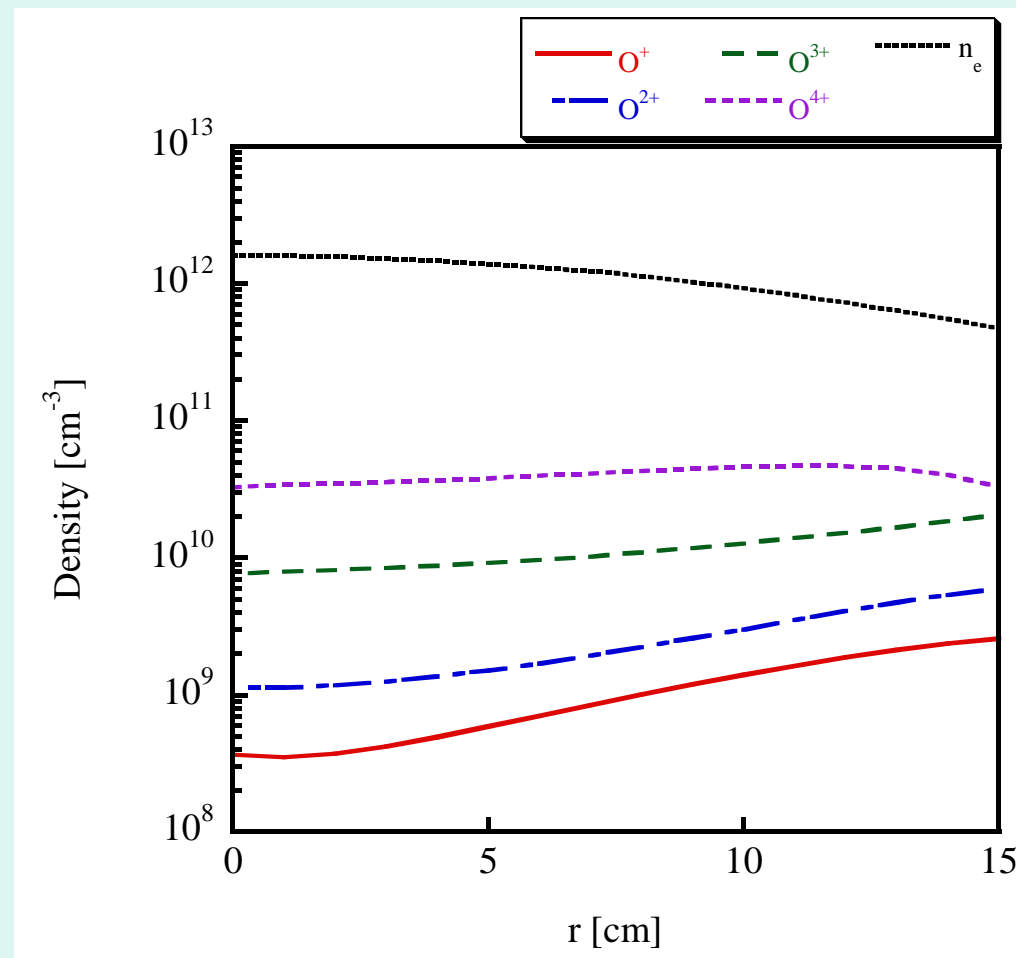
酸素イオン密度分布

CT100で計測した酸素イオンスペクトルと衝突・輻射モデルから、各価数の酸素イオン密度分布を導出した。

この結果から、GAMMA 10における不純物の電離・輸送過程の研究を進めている。

→ CT100では固定放電shotにおいてのみ、各価数の強度比を見ているため、計測データは非常に少ない。

→ 今回新規構築した多チャンネル検出器により、RFパワー依存等の研究を進める予定



結論と今後の課題

不純物モニタリングシステムを新規に製作した

- 波長分解能、感度を評価した。絶対感度校正を行った。
- 分光器を2台用いることで紫外・可視域のスペクトルを単一ショットで計測可能

GAMMA 10プラズマに適用した初期結果

- 不純物同定
- 放射損失量のプラズマパラメータ依存性
- 衝突・輻射モデルを用いた電子密度の導出
- 壁コンディショニング時のスペクトル発光強度の振る舞い
- ペレット入射時の発光強度の変化

衝突・輻射モデルと3系統の紫外・可視分光計測システムを用いて、GAMMA 10における不純物の挙動を明らかにする。

Acknowledgments

The authors would like to thank members of GAMMA 10 group of the Plasma Research Center, University of Tsukuba for their collaboration.

This work was partly supported by the the Ministry of Education, Sports, Science and Technology, Grant-in-aid for Scientific Research in Priority Areas, No. 16082203.

This work is performed with the support and under the auspices of the NIFS Collaborative Research Program.