



祥慶 10万運転時間
おめでとうございます

タンデム加速器による固体内衝突過程
—ゼロ度電子分光法とENMAによる実験研究—



今井 誠(京都大学原子核工学専攻)

祥慶 10万運転時間
おめでとうございます

ゼロ度電子分光 (BL-H2)

19970820～2008 127日間 = 3048運転時間

ENMA 閻魔 (BL-L3)

20011025～2008 55日間 = 1320運転時間



共同研究者

● ゼロ度電子分光法



左高 正雄, 須貝 宏行 (原研)

川面 澄, 高廣 克己, 小牧 研一郎, 柴田 裕実

北澤 真一, 樫本 洋 (原研), 俵 博之, 山崎 泰規,
金井 保之, 東 俊行, U.I. Safronova, I.Yu Tolstikhina

● ENMA 閤魔

左高 正雄, 須貝 宏行, 西尾 勝久 (原研)

川面 澄, 高廣 克己, 小牧 研一郎, 柴田 裕実

杉山 康治 (原研), V.P. Shevelko

イオンー固体衝突過程

● 非弾性過程

ターゲット電子(単・多重)励起, ターゲット電離・弾き出し,
入射イオン励起, 電離(電子損失), 電子捕獲,
連続状態への電子捕獲(ECC)・損失(ELC),
脱励起, オージェ(コスタークロニッヒ)電子放出 などなど

● 測定対象(プローブ)

ターゲット二次イオン, 二次電子エネルギー, 散乱角,
入射イオン価数変化, エネルギー損失, 散乱角,
オージェ(コスタークロニッヒ)電子・X線分光 などなど

イオンー固体衝突過程(ゼロ度電子分光)

● 非弾性過程

ターゲット電子(単・多重)励起, ターゲット電離・弾き出し,
入射イオン励起, 電離(電子損失), 電子捕獲,
連続状態への電子捕獲(ECC)・損失(ELC),
脱励起, オージェ(コスタークロニッヒ)電子放出 などなど

● 測定対象(プローブ)

ターゲット二次イオン, 二次電子エネルギー, 散乱角,
入射イオン価数変化, エネルギー損失, 散乱角,
オージェ(コスタークロニッヒ)電子・X線分光 などなど

イオンー固体衝突過程(ゼロ度電子分光)

● 非弾性過程

ターゲット電子(単・多重)励起, ターゲット電離・弾き出し,
入射イオン励起, 電離(電子損失), 電子捕獲,
連続状態への電子捕獲(ECC)・損失(ELC),
脱励起, オージェ(コスタークロニッヒ)電子放出 などなど

● 測定対象(プローブ)

ターゲット二次イオン, 二次電子エネルギー, 散乱角,
入射イオン価数変化, エネルギー損失, 散乱角,
オージェ(コスタークロニッヒ)電子・X線分光 などなど

イオンー固体衝突過程 (ENMA 閻魔)

● 非弾性過程

ターゲット電子(単・多重)励起, ターゲット電離・弾き出し,
入射イオン励起, 電離(電子損失), 電子捕獲,
連続状態への電子捕獲(ECC)・損失(ELC),
脱励起, オージェ(コスタークロニッヒ)電子放出 などなど

● 測定対象(プローブ)

ターゲット二次イオン, 二次電子エネルギー, 散乱角,
入射イオン価数変化, エネルギー損失, 散乱角,
オージェ(コスタークロニッヒ)電子・X線分光 などなど

イオンー固体衝突過程 (ENMA 閻魔)

● 非弾性過程

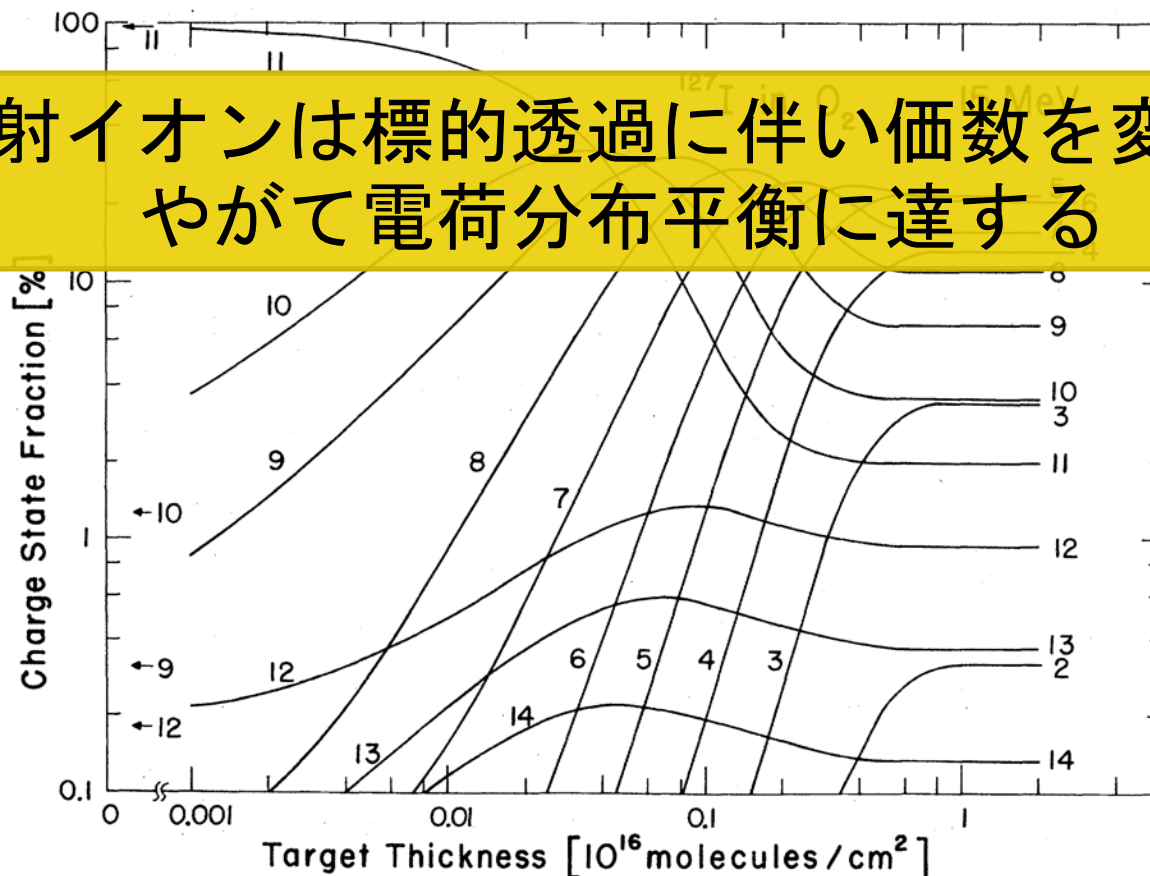
ターゲット電子(単・多重)励起, ターゲット電離・弾き出し,
入射イオン励起, 入射イオン価数の平衡化,
連続状態への電子捕獲(ECC)・損失(ELC),
脱励起, オージェ(コスタークロニツヒ)電子放出 などなど

● 測定対象(プローブ)

ターゲット二次イオン, 二次電子エネルギー, 散乱角,
入射イオン価数変化, エネルギー損失, 散乱角,
オージェ(コスタークロニツヒ)電子・X線分光 などなど

ターゲット厚に対する平均電荷の変化(平衡化)

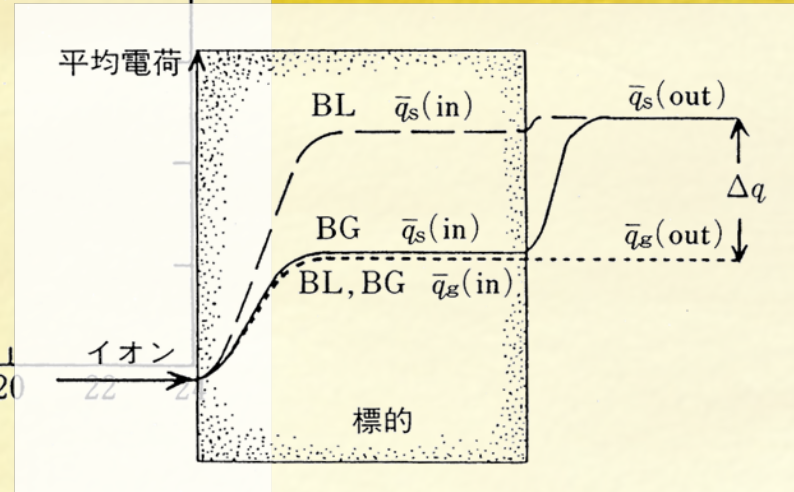
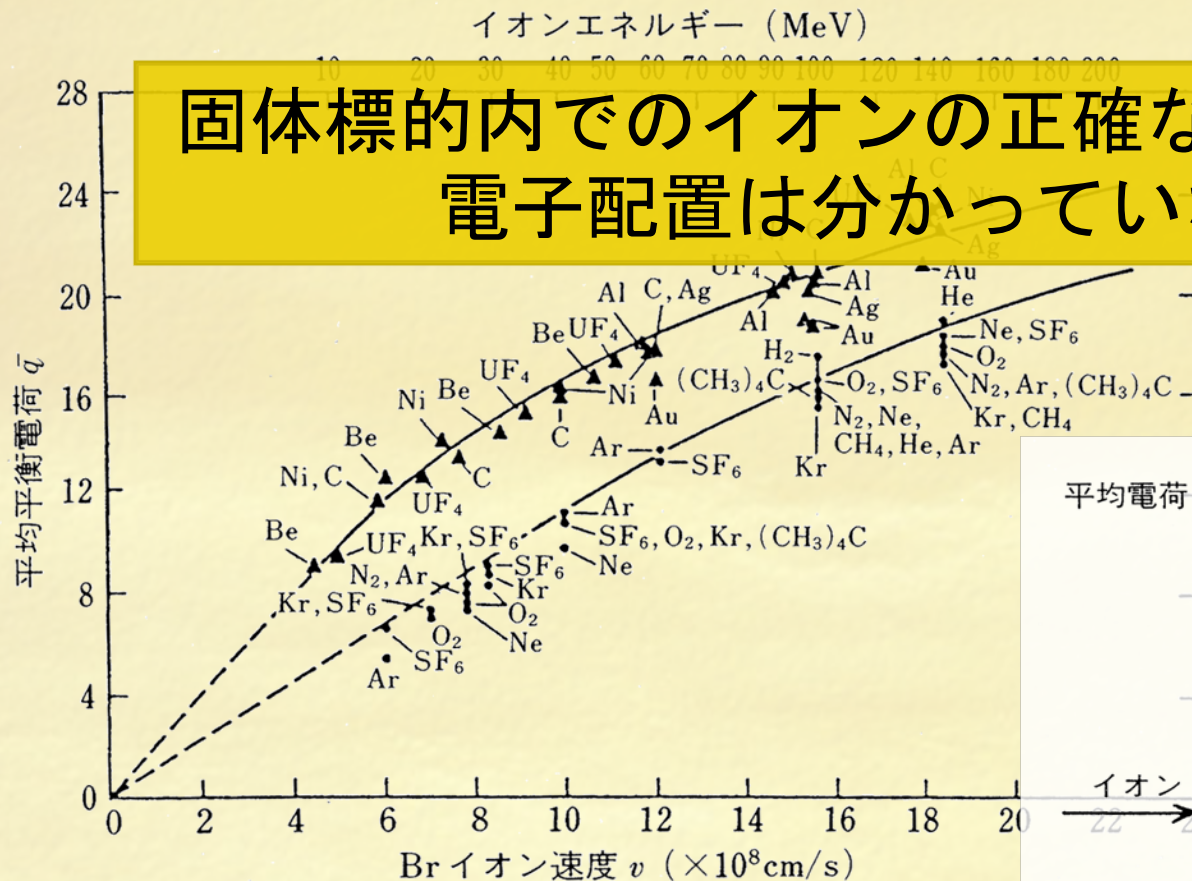
入射イオンは標的透過に伴い価数を変え、
やがて電荷分布平衡に達する



図出典：H.-D. Betz, Rev. Mod. Phys. 44, 465 (1972).

$$\bar{q} = \sum_q q F(q), \quad d = \left[\sum_q (q - \bar{q})^2 F(q) \right]^{1/2}, \quad \sum_q F(q) = 1$$

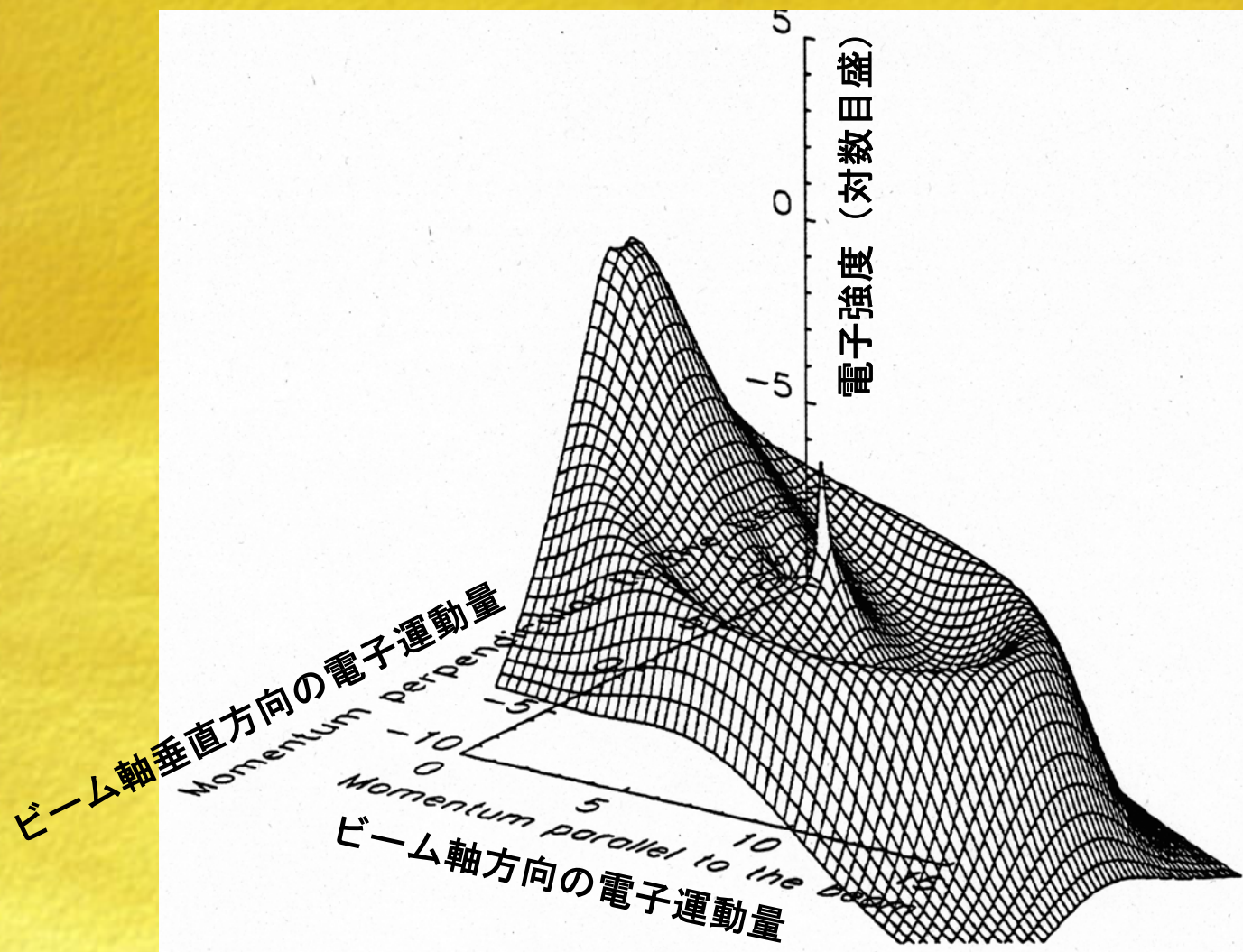
衝突後イオン平均電荷の密度効果



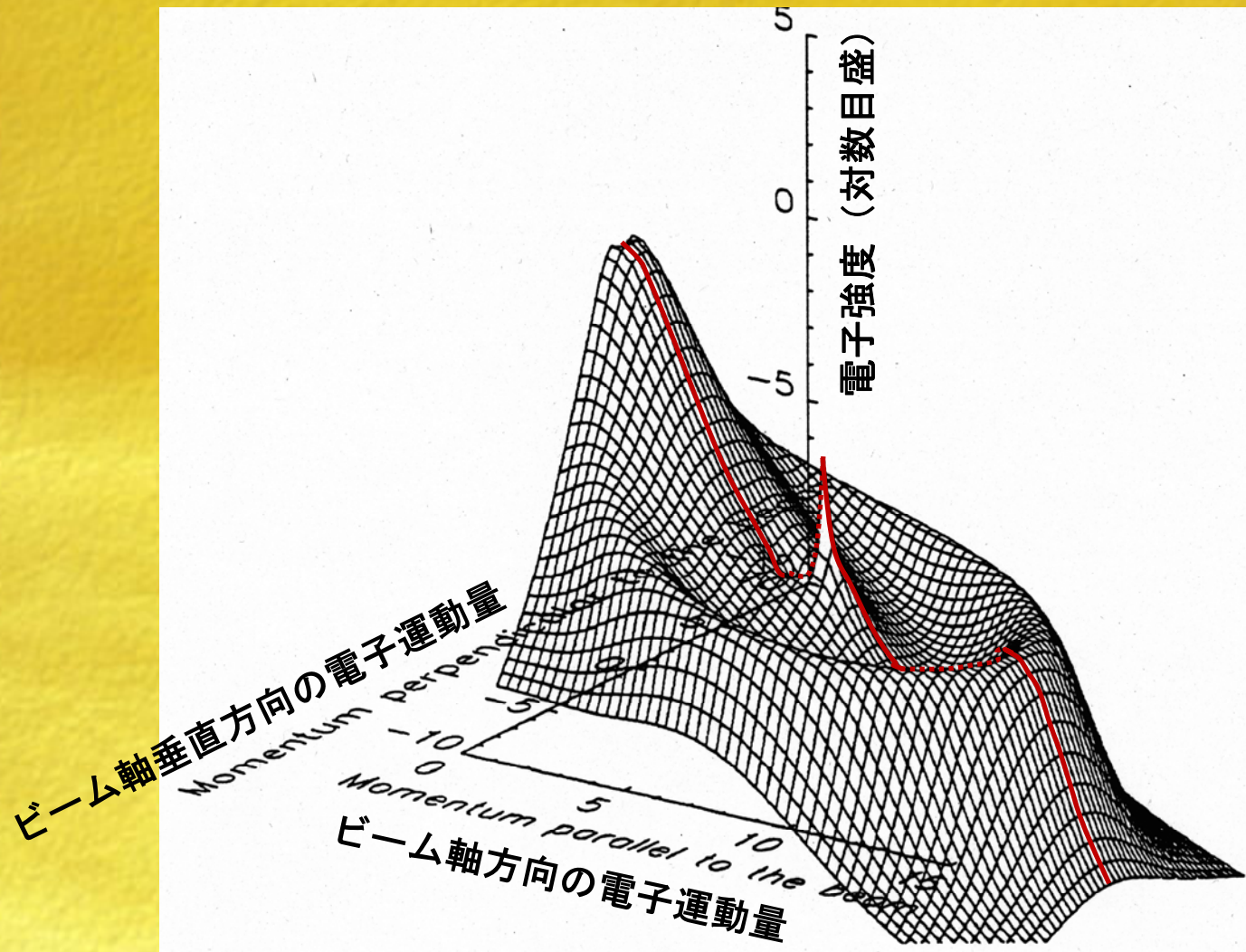
Br イオンの平均電荷 $\bar{q}$. ▲印は固体, ●印は気体標的.

図出典: 藤本文範・小牧研一郎共編 イオンビーム工学 イオン・固体相互作用編 内田老鶴園 (1995).

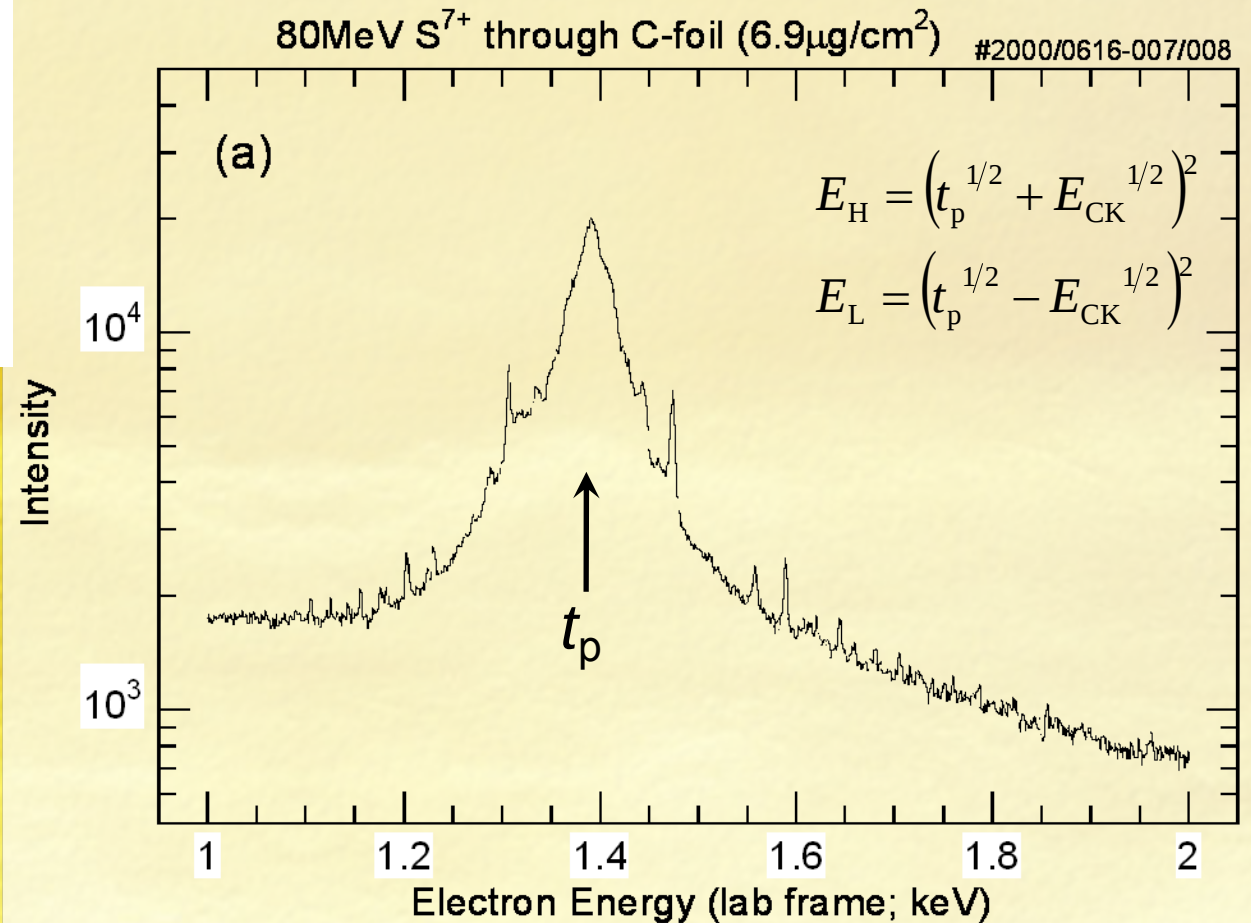
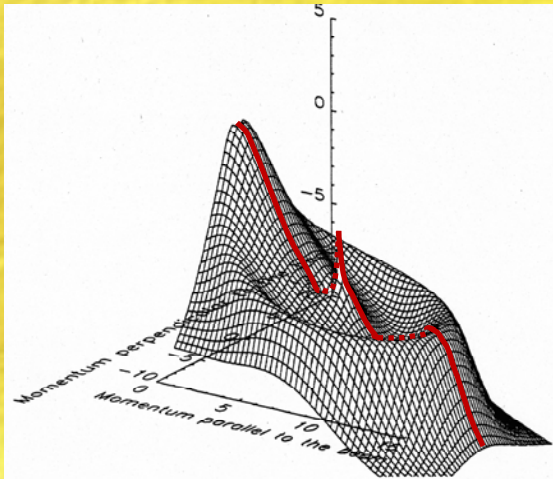
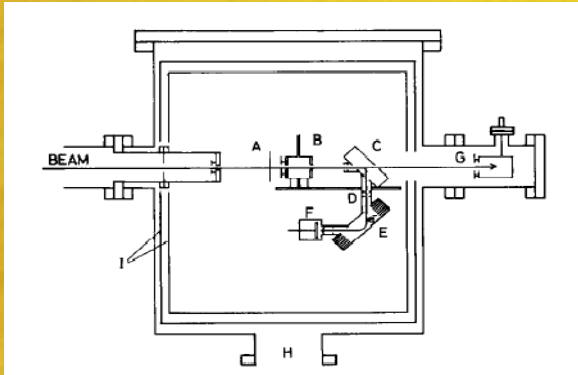
イオン衝突における放出二次電子スペクトル



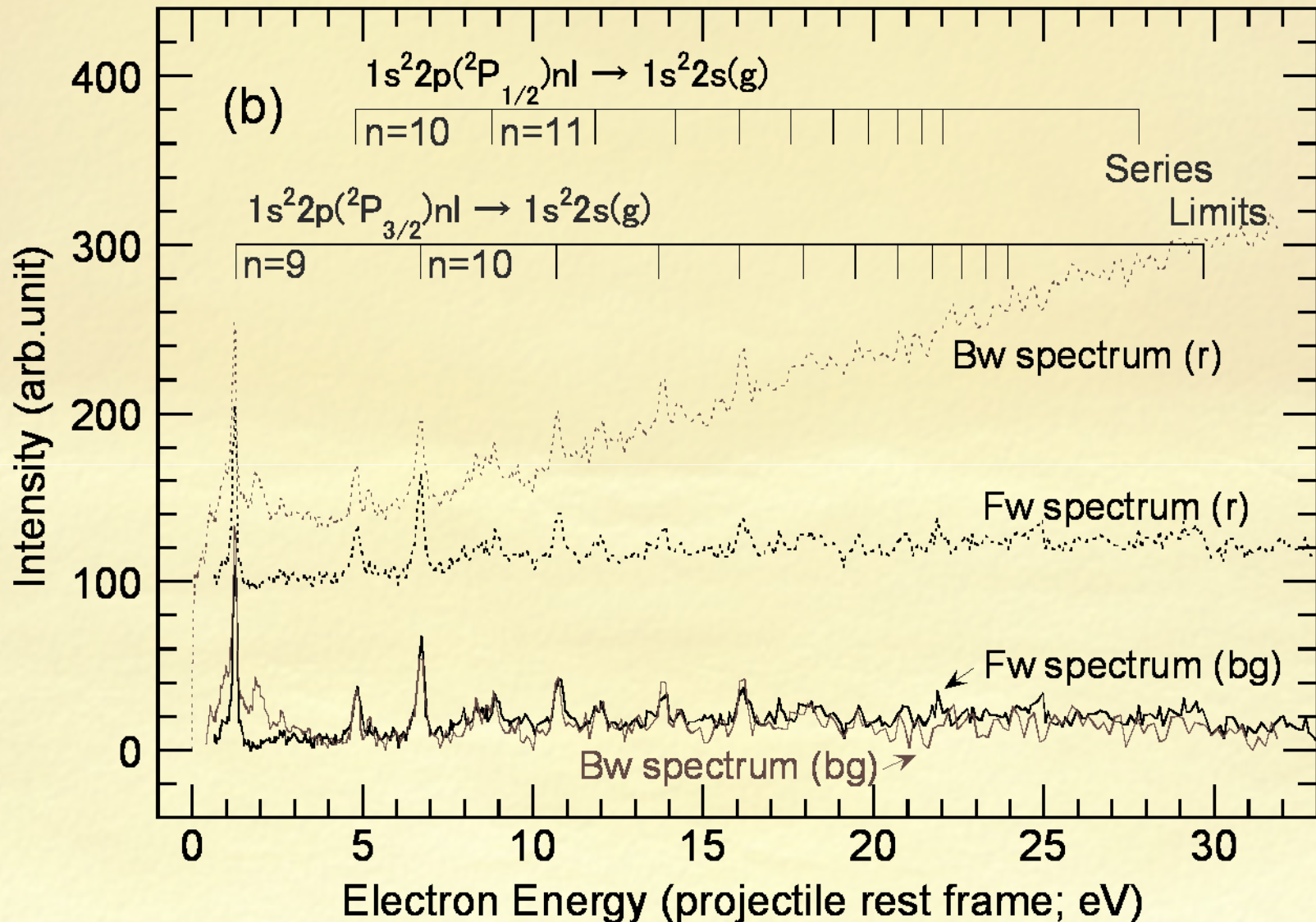
イオン衝突におけるゼロ度方向二次電子スペクトル



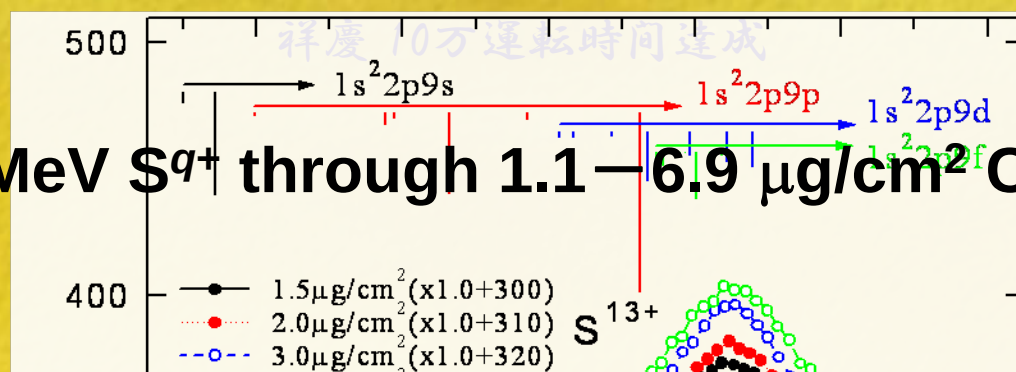
イオンー固体衝突における放出二次電子スペクトル



80 MeV S⁷⁺ through 6.9 μg/cm² C-foil

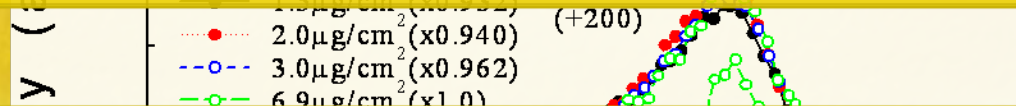


80 MeV S^{q+} through 1.1–6.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ C-foil



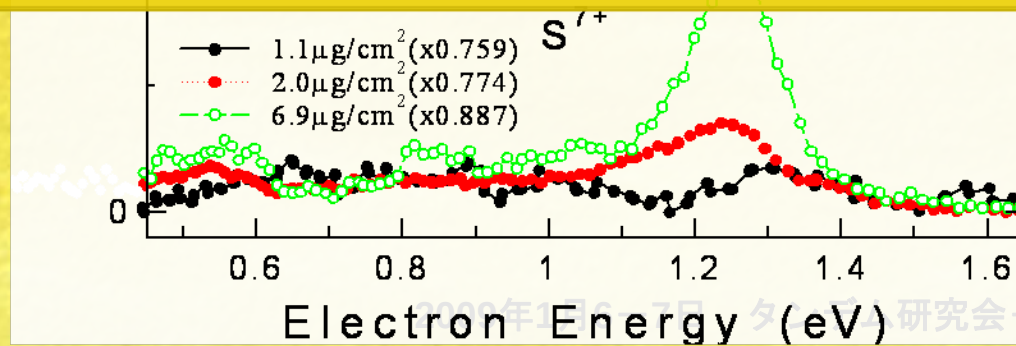
$S^{7+,10+}$ 入射時、標的膜厚の増加とともに
固体内で S^{13+} $1s^2 2p(^2P)$ 量が増加する過程を観測

M. Imai et al., Nucl. Instr. and Meth. B 193, 674 (2002).



ELC過程起源($S^{7+,10+,12+}$ 入射時)のC-K電子の
方位量子数が、標的膜厚増加とともに
高角運動量側に遷移する

M. Imai et al., Nucl. Instr. and Meth. B 193, 674 (2002).

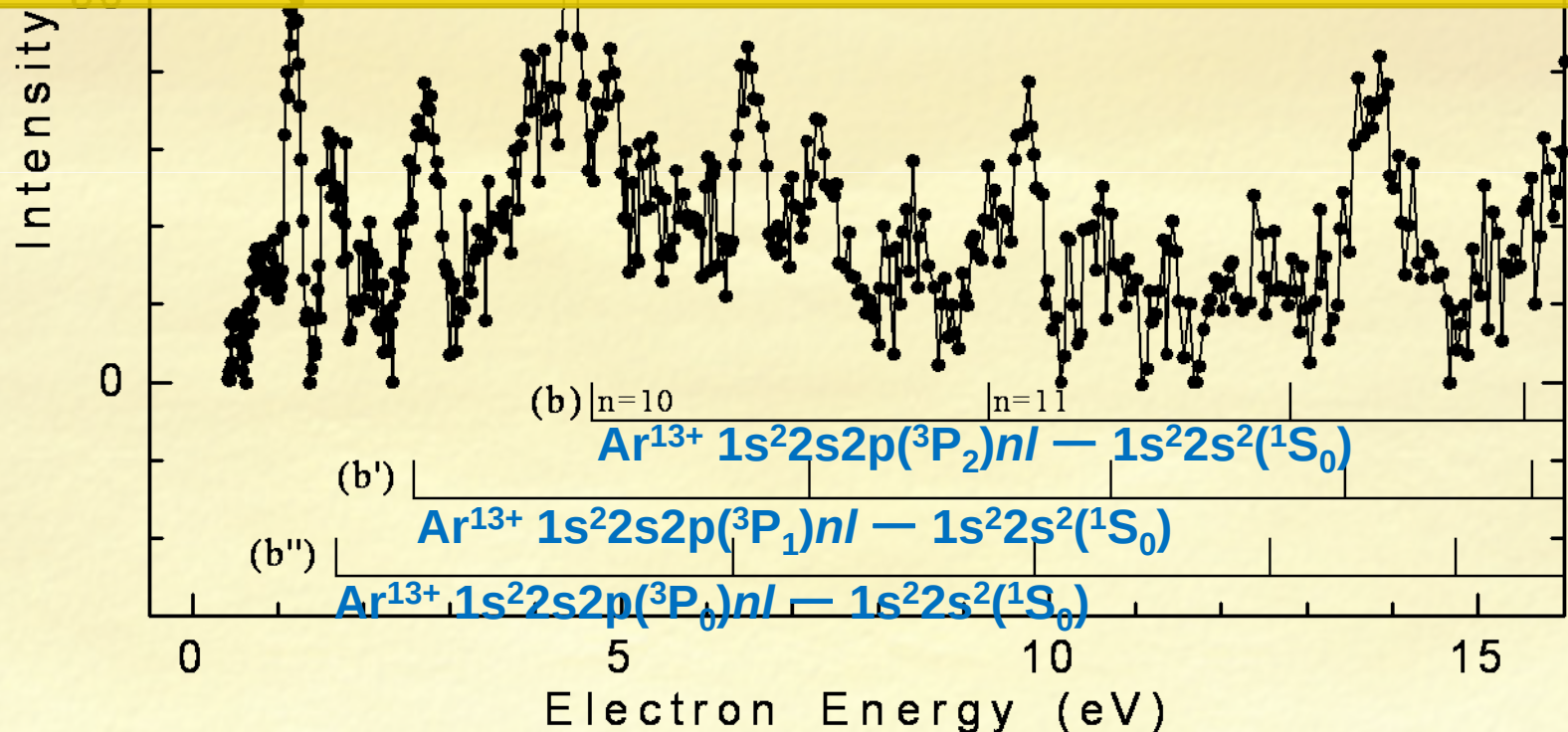


80 MeV Ar⁶⁺ through 4.0 μg/cm² C-foil

#010-High

Ar⁶⁺入射時、固体内でAr¹⁵⁺ 1s²2p(²P)と
Ar¹⁴⁺ 1s²2s2p(³P)が存在している

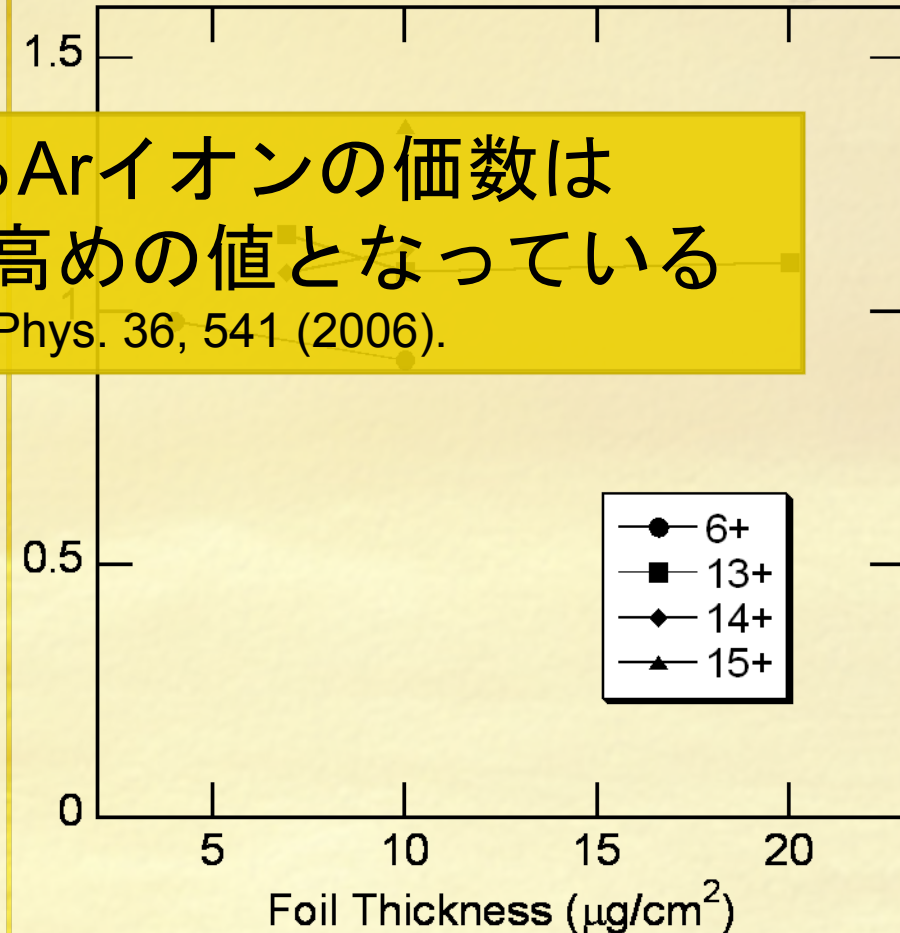
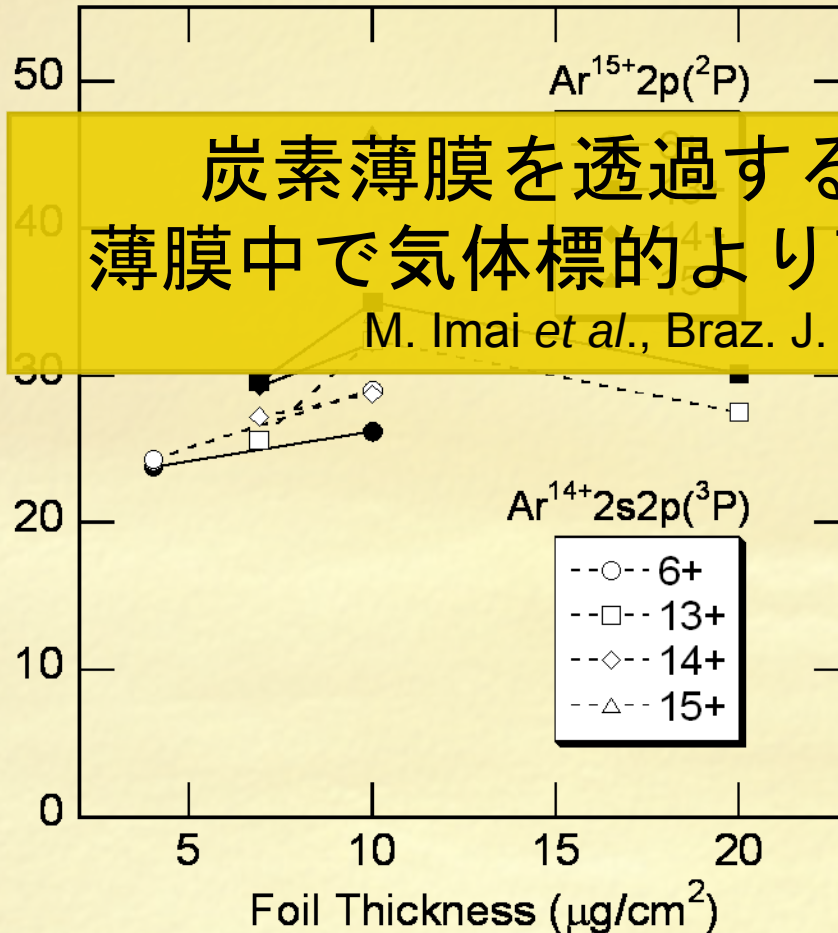
M. Imai et al., Braz. J. Phys. 36, 541 (2006).



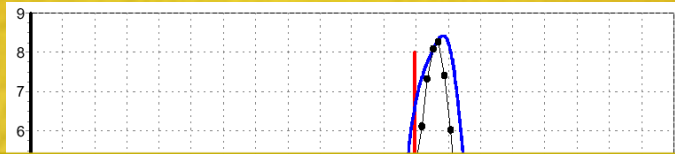
80 MeV Ar⁶⁻¹⁵⁺ through 4.0–20 μg/cm² C-foil

炭素薄膜を透過するArイオンの価数は
薄膜中で気体標的より高めの値となっている

M. Imai et al., Braz. J. Phys. 36, 541 (2006).

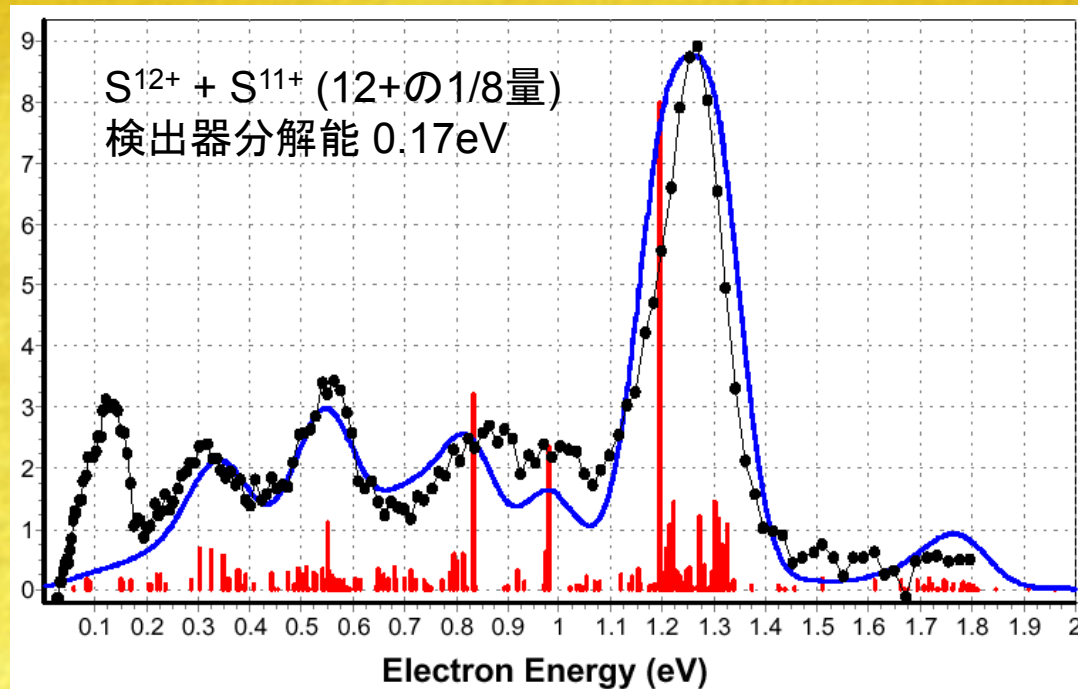


64 MeV S^{12+} through $2.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ C-foil

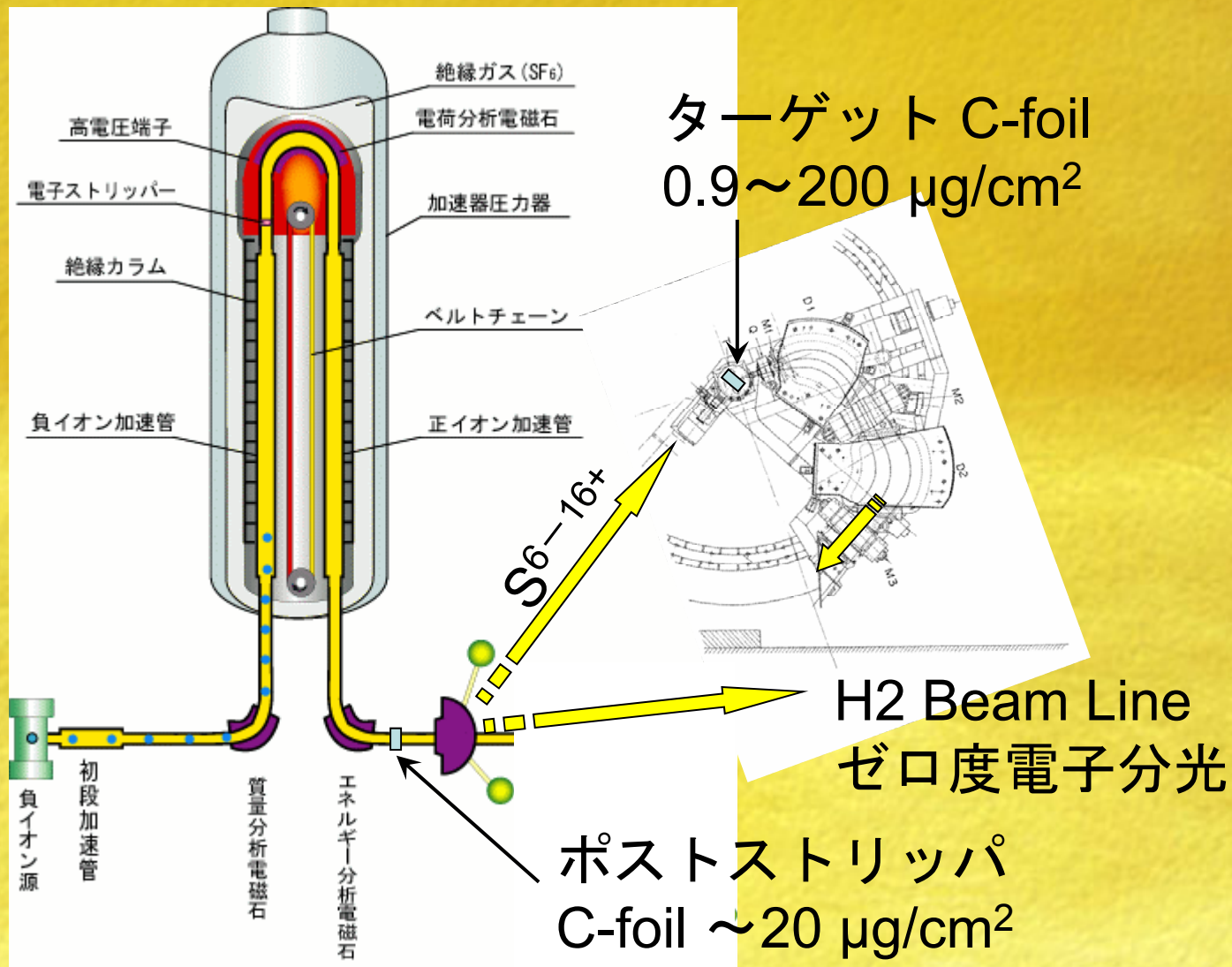


S^{12+} 入射時、 $2.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 炭素薄膜出射直前の
 $S^{13+} 1s^2 2p$ と $S^{12+} 1s^2 2p^2$ の存在比は 8:1

M. Sataka *et al.*, Phys. Rev. A 65, 052704 (2002).

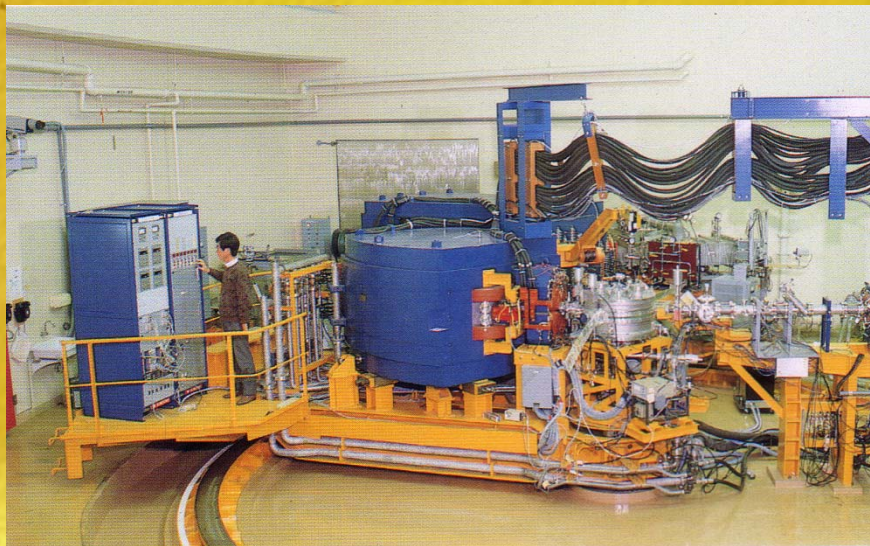


炭素極薄膜出射後のイオン価数分布測定

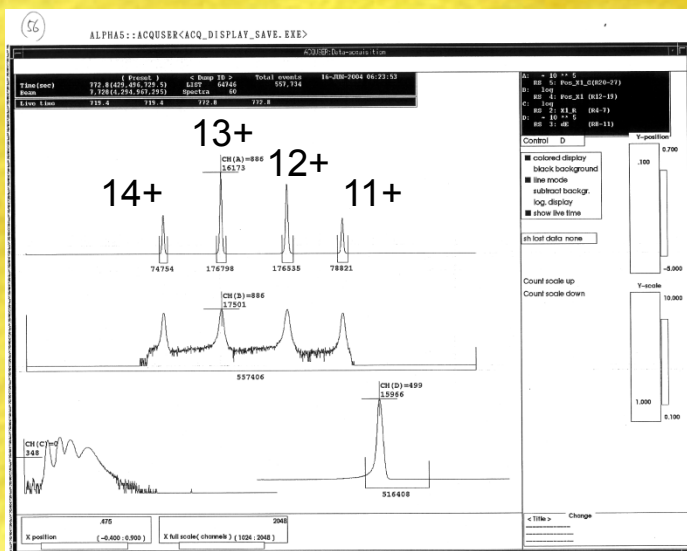


祥慶 10万運転時間達成

重イオンスペクトロメータ 閻魔

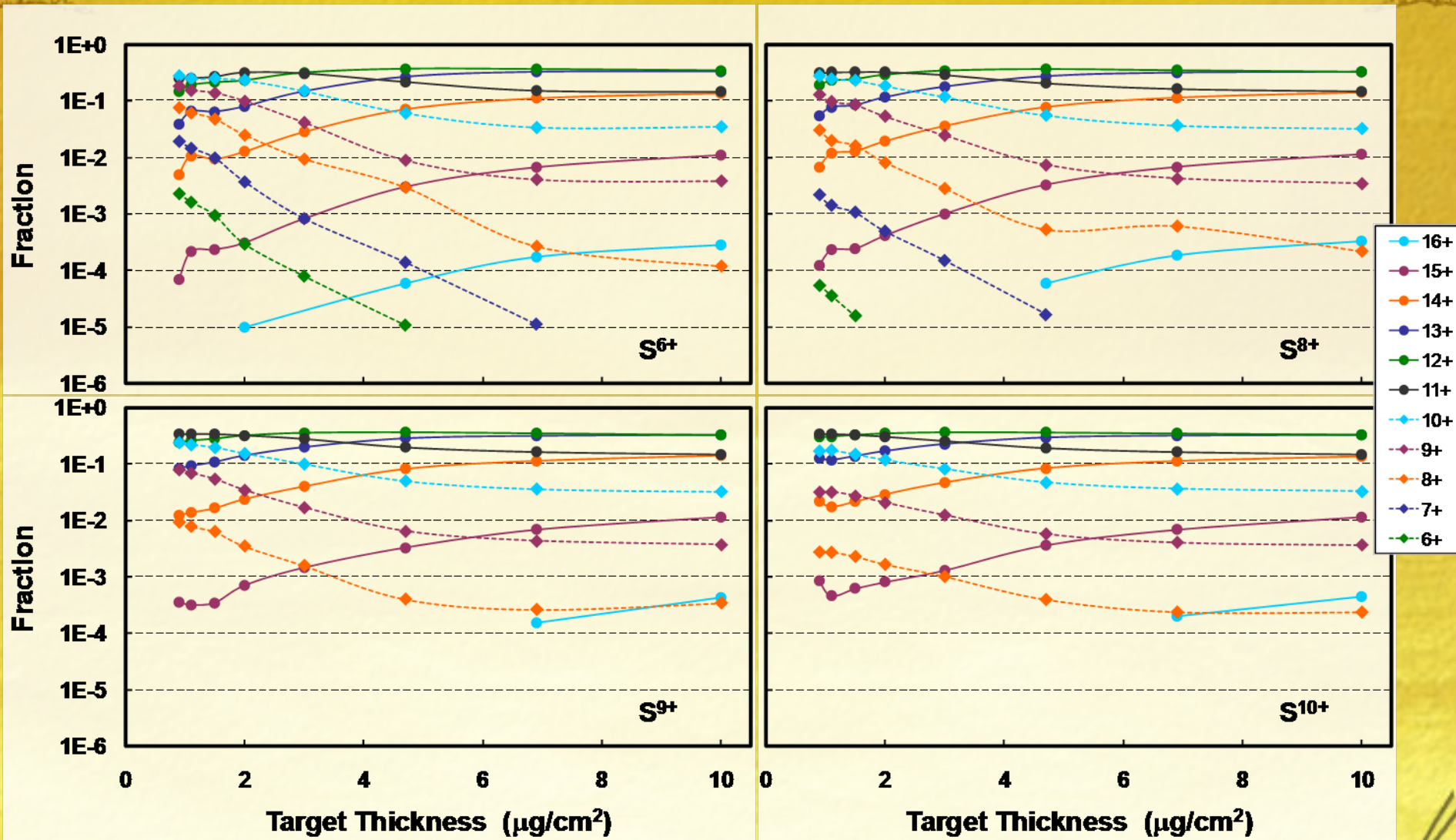


S⁸⁺ 入射
10 μ g/cm² C-foil

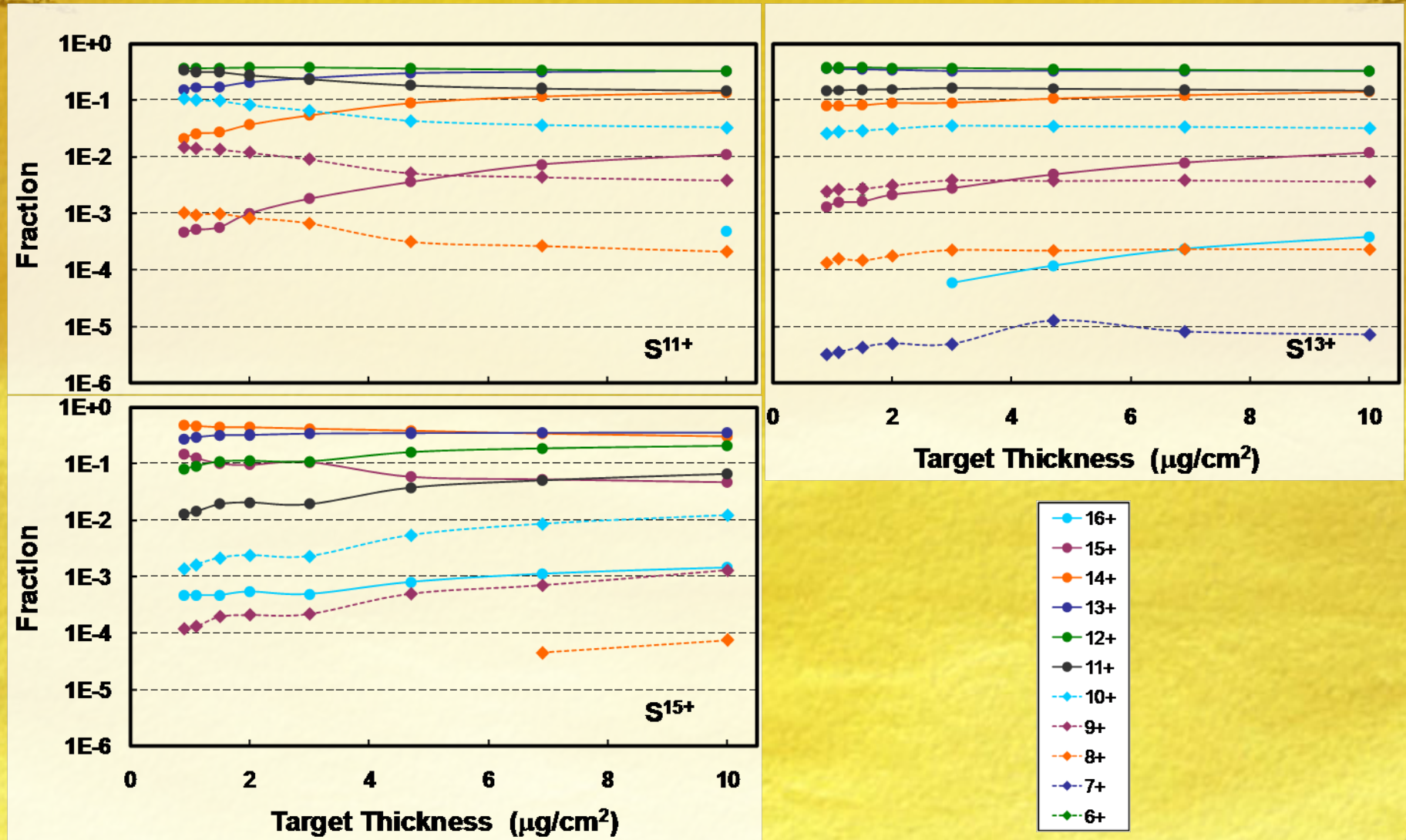


2009年1月6-7日 タンデム研究会-10万運転時間達成記念-

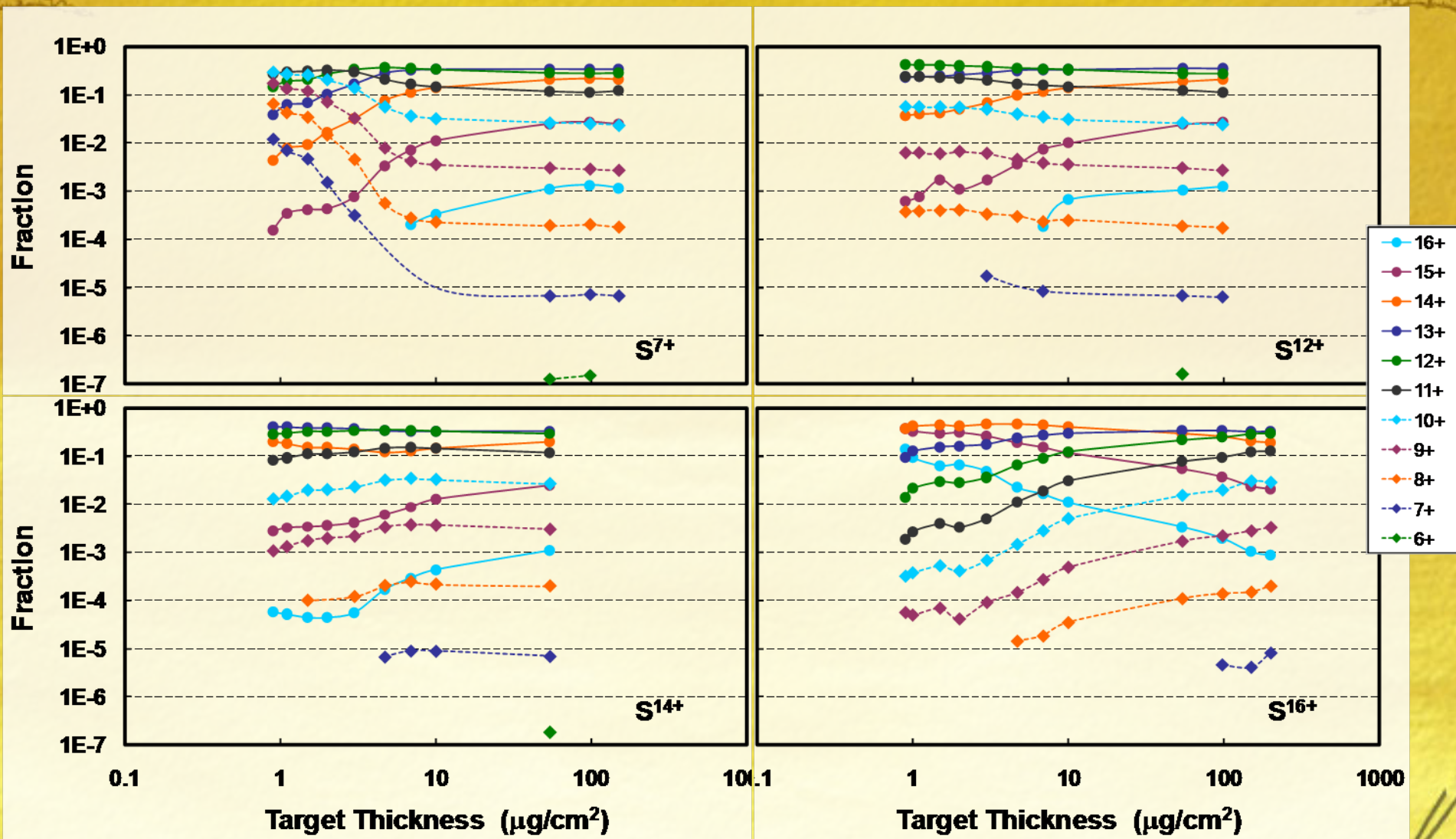
64 MeV S⁶⁻¹⁰⁺ through 0.9–10 μg/cm² C-foil



64 MeV S^{11–15+} through 0.9–10 μg/cm² C-foil



64 MeV S⁷⁻¹⁶⁺ through 0.9–200 μg/cm² C-foil



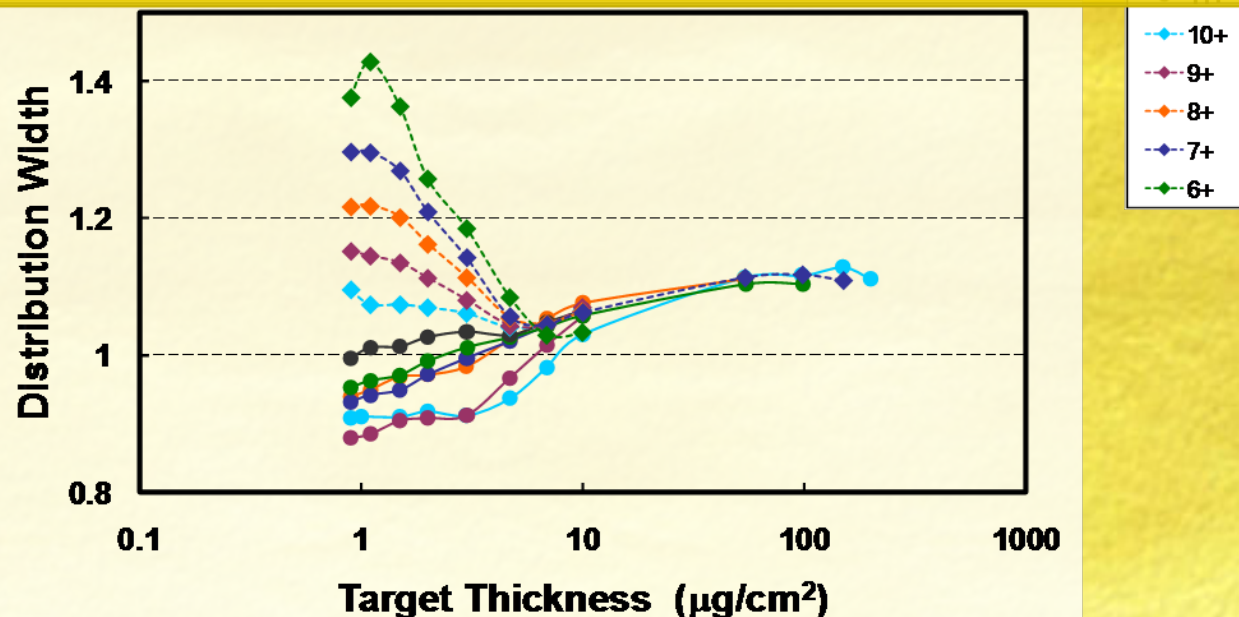
64 MeV S⁶⁻¹⁶⁺ through 0.9–200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ C-foil

タンデムエネルギー領域 (2.0 MeV/u) にて 初の非平衡電荷分布と平衡化過程の測定

M. Imai *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B 230, 63 (2005).

M. Imai *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B 256, 11 (2007).

M. Imai *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B, submitted.



ゼロ度電子分光実験まとめ

- タンデムエネルギー領域(2.0, 2.5MeV/u)で炭素薄膜透過後のS, SiならびにArイオンより放出される二次電子スペクトルを精密測定した。
- 2.5MeV/u $S^{7+,10+}$ イオン入射時、標的膜厚の増加により固体内 $S^{13+} 1s^2 2p(2p)$ 量が増加した。
- ELC過程起源のC-K電子の方位量子数が、標的膜厚増加とともに高角運動量側に遷移することが観測された。
- 炭素薄膜を透過するAr, Siイオンの価数は、薄膜中で既に気体標的の値より大きくなっている。

ENMA 閻魔実験まとめ

- タンデムエネルギー領域(2MeV/u)でSイオンの炭素薄膜透過後の非平衡ならびに平衡電荷分布を測定した。
- $S^{6\sim 14+}$ イオン入射では膜厚 $6.9\mu\text{g/cm}^2$ 付近で同じ平均電荷となった後、平衡に向かってゆっくり電荷を増すのに対し、 $S^{15,16+}$ イオン入射時は直接平衡へと到達する。平衡到達膜厚は $100\sim 150\mu\text{g/cm}^2$ となった。
- 前項の傾向はK殻L殻の電荷変換断面積の違いにより理解できる。
- さらに、炭素薄膜内でのエネルギー損失を測定中。