

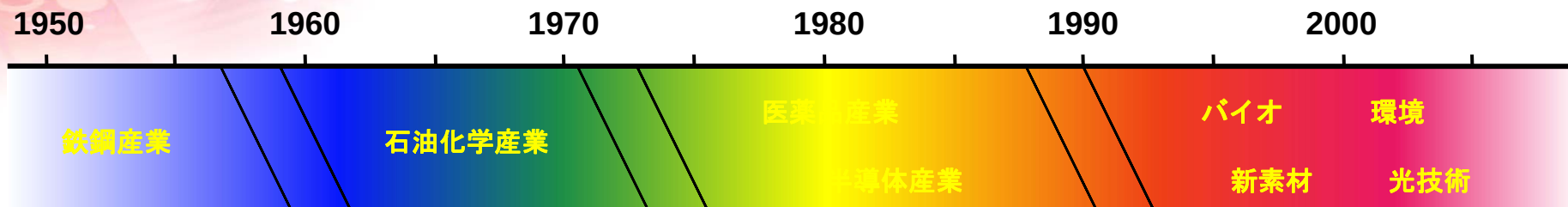
ICP-OESおよびICP-MSによる 金属分析法概論

産業技術総合研究所 計測標準研究部門

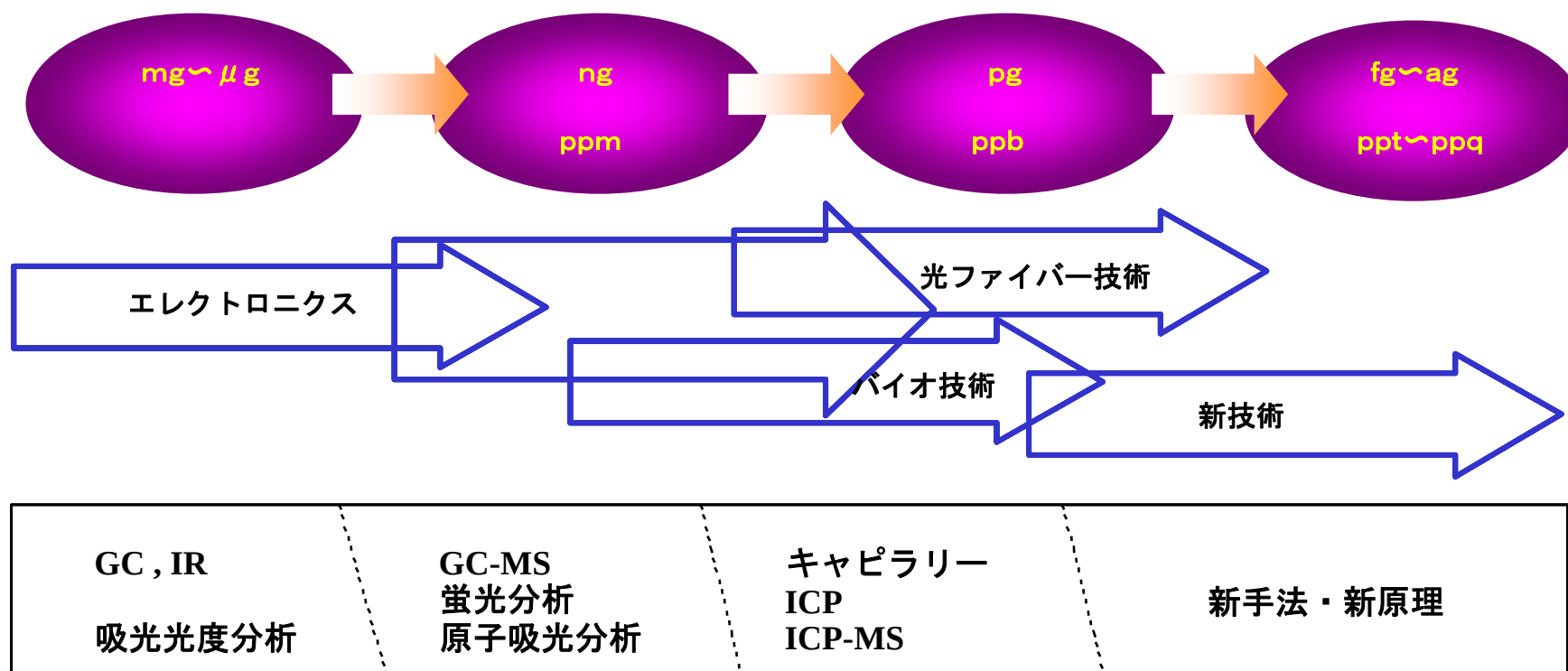
野々瀬菜穂子 (naoko-nonose@aist.go.jp)

物質計測・分析手法の変遷

主要産業の変化



高感度化と計測手法



微量元素分析が何故重要なのか？

・生化学・医学分野

生体必須元素が、＜欠乏－毒性＞に働くか、生体内でのコントロール条件は、非常に狭くかつ微量の濃度域によって支配されている。

・環境化学

環境中(水・大気・土壌)に曝露される毒性物質(有機金属)は、極微量でも人体に悪影響を及ぼす。環境保全のための様々な法規制がされている。

・工業材料(半導体を中心に)

シリコンに代表される超高純度物質の性能は、材料に含まれる微量元素によって大きな影響を受ける。製品の効率的な生産のためには、微量元素のコントロールが重要。

・地質学

地球の進化(歴史的・地理的・文化的)を探るには、岩石や植物などに含まれる微量元素存在パターンが有益な情報となる。

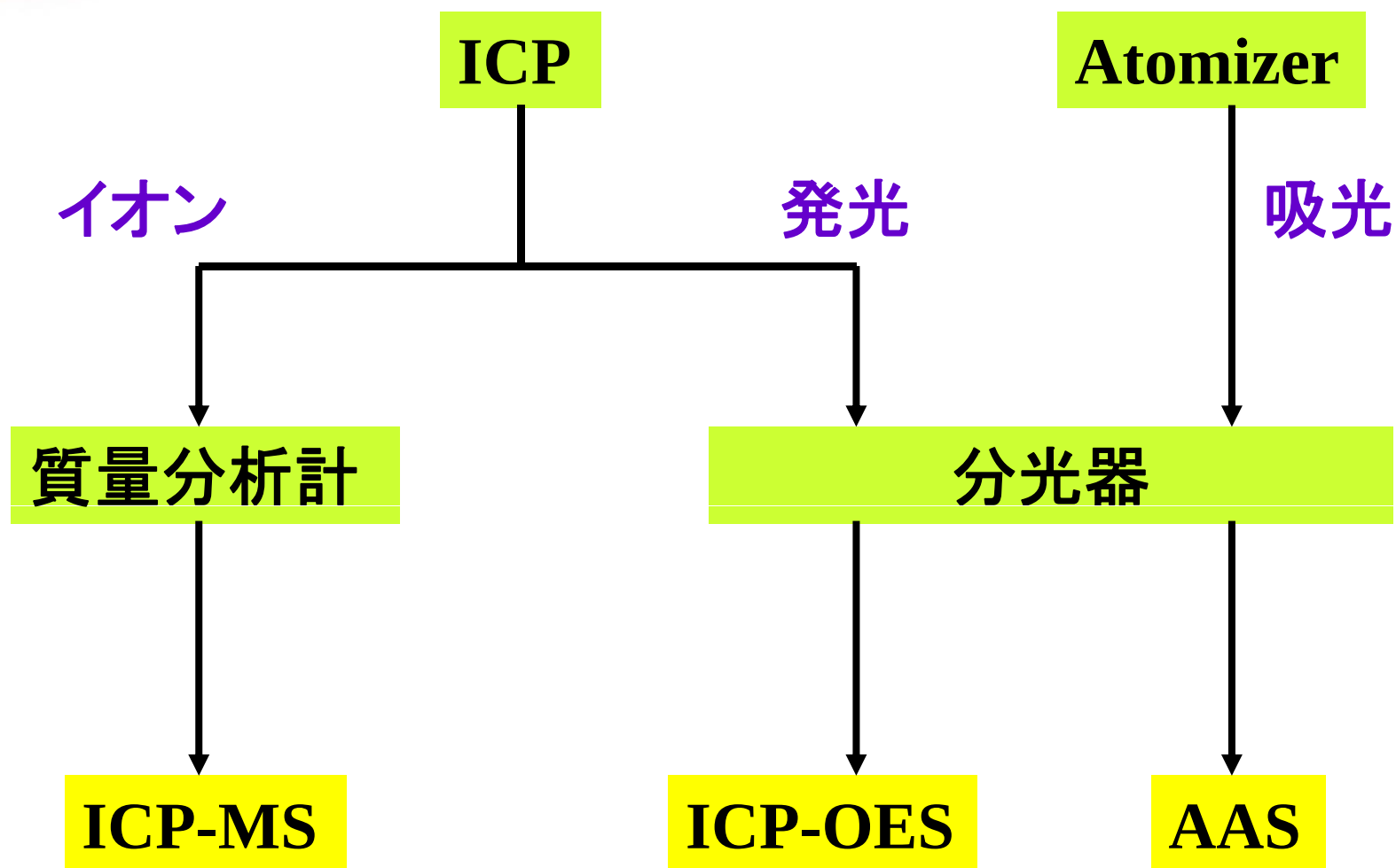
参考文献:「微量元素分析の実際」 原口ら共訳(丸善)

環境保全のための様々な法規制(一例)

	水質基準	排水基準
カドミウム及びその化合物	0.003 mg/L	0.1 mg/L
シアン化合物	0.01 mg/L	1 mg/L
鉛及びその化合物	0.01 mg/L	0.1 mg/L
六価クロム化合物	0.05 mg/L	0.5 mg/L
砒素及びその化合物	0.01 mg/L	0.1 mg/L
水銀及びアルキル水銀など	0.0005 mg/L	0.005 mg/L
セレン及びその化合物	0.01 mg/L	0.1 mg/L
ホウ素及びその化合物	1.0 mg/L	10 mg/L(海域以外)
フッ素及びその化合物	0.8 mg/L	8 mg/L(海域以外)
アルミニウム及びその化合物	0.2 mg/L	

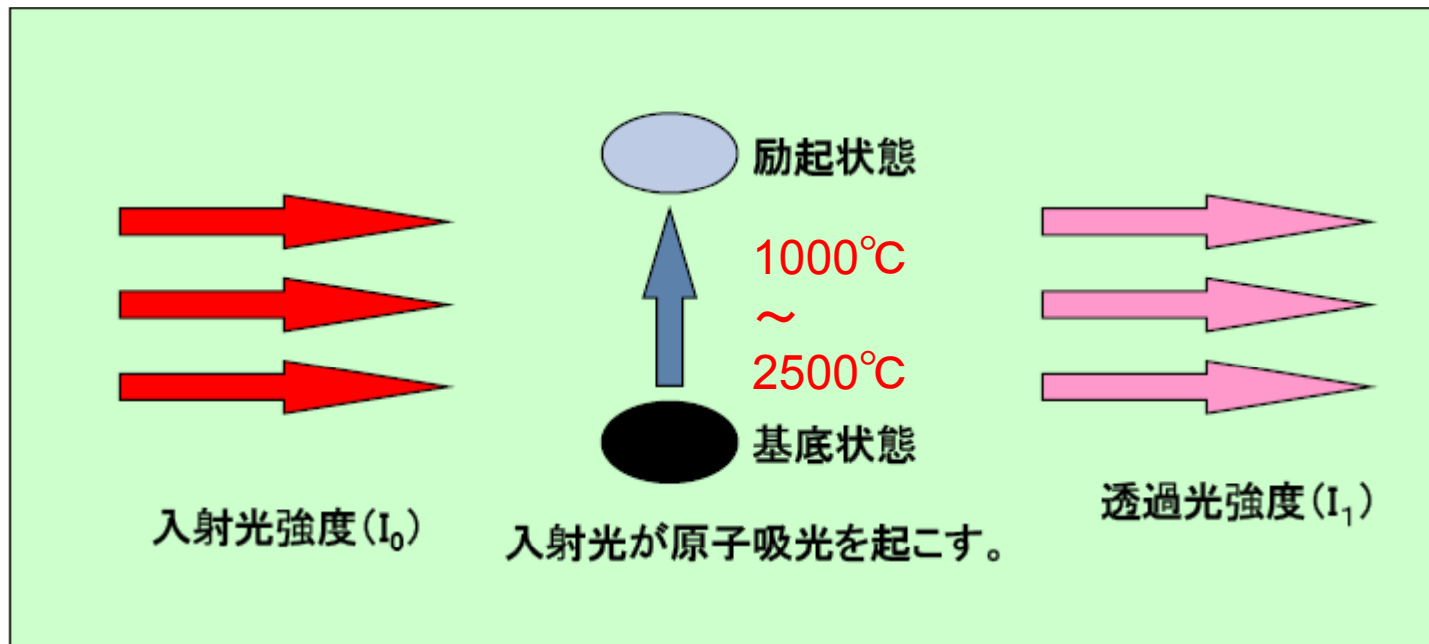
mg/L=ppm

微量元素分析法



原子吸光分析(AAS)の原理

ホロカソードランプなど

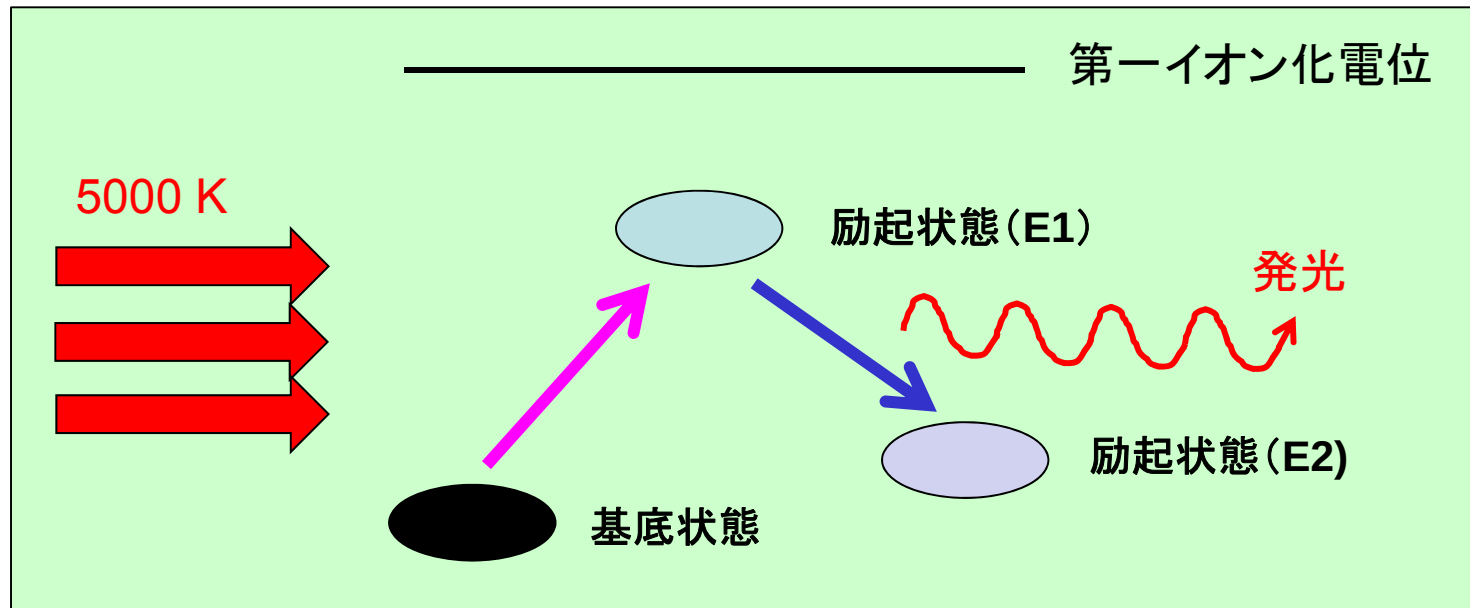


- ベールの法則 : 吸光度、 A は溶液濃度と比例関係にある。
- $A = \log_{10} I_0 / I_t$

サーモフィッシャーサイエンティフィック(株)の技術資料より引用

ICP発光分光分析の原理

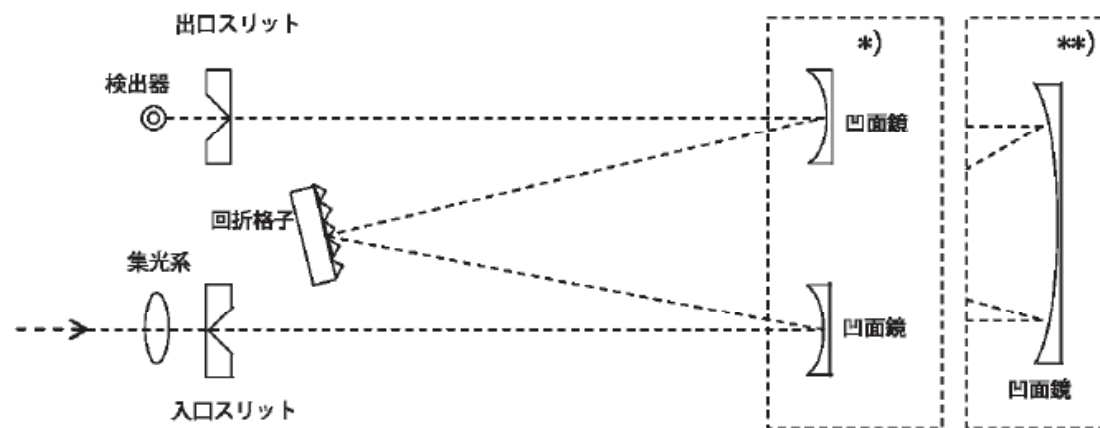
プラズマなどの励起源



$$E1-E2=h\nu \quad \text{プランク定数} \times \text{振動数}$$

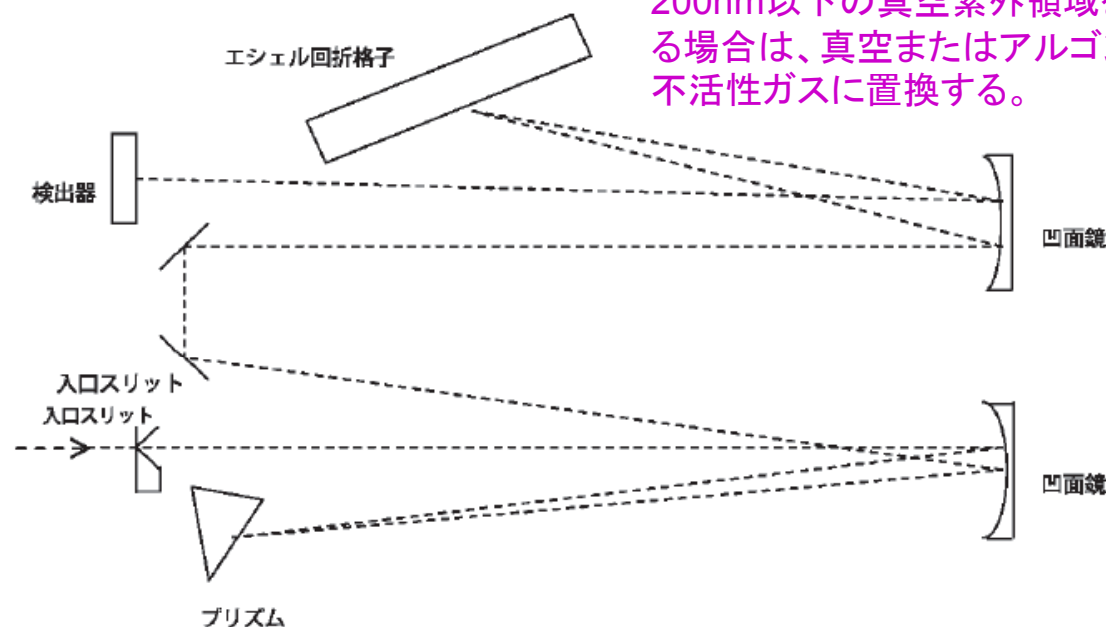
AASやICP-OESで用いられる光学系

ツェルニーターナー型
(エバート型)



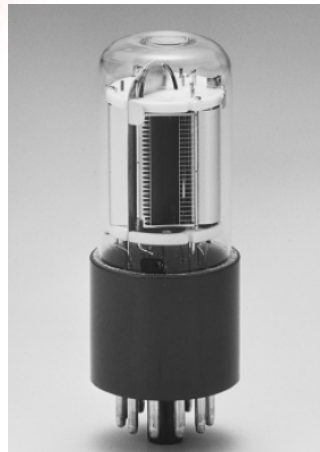
200nm以下の真空紫外領域を測定する場合は、真空またはアルゴンなどの不活性ガスに置換する。

エシェル型

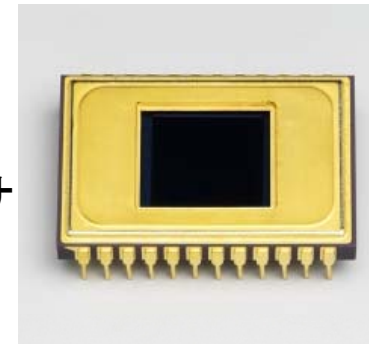


AASやICP-OESで用いられる検出器

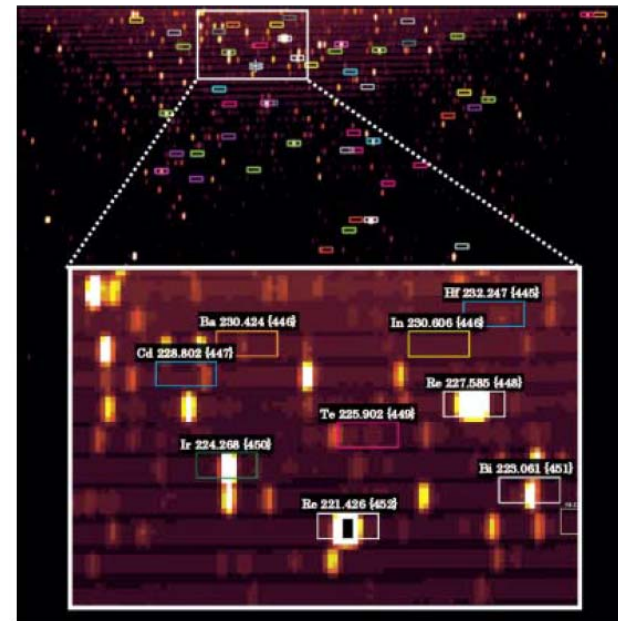
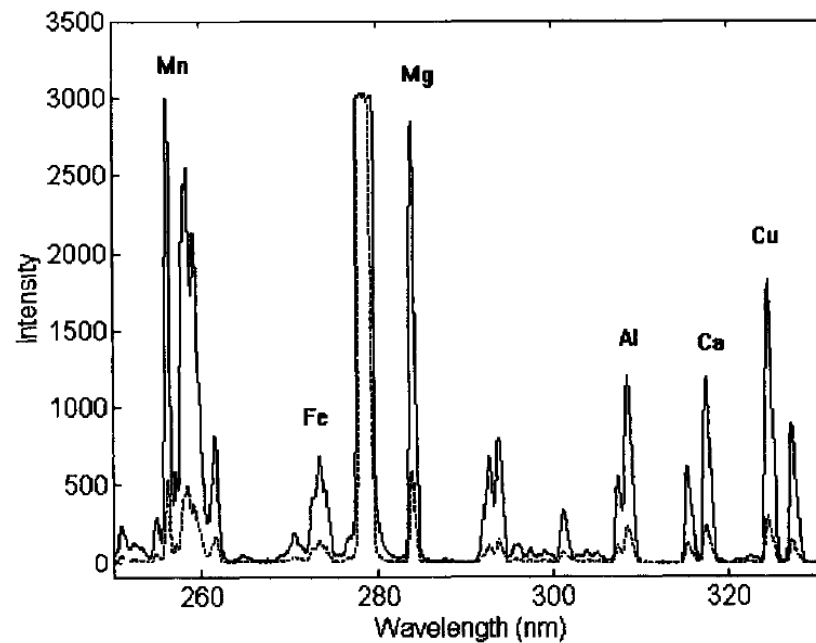
光電子増倍管

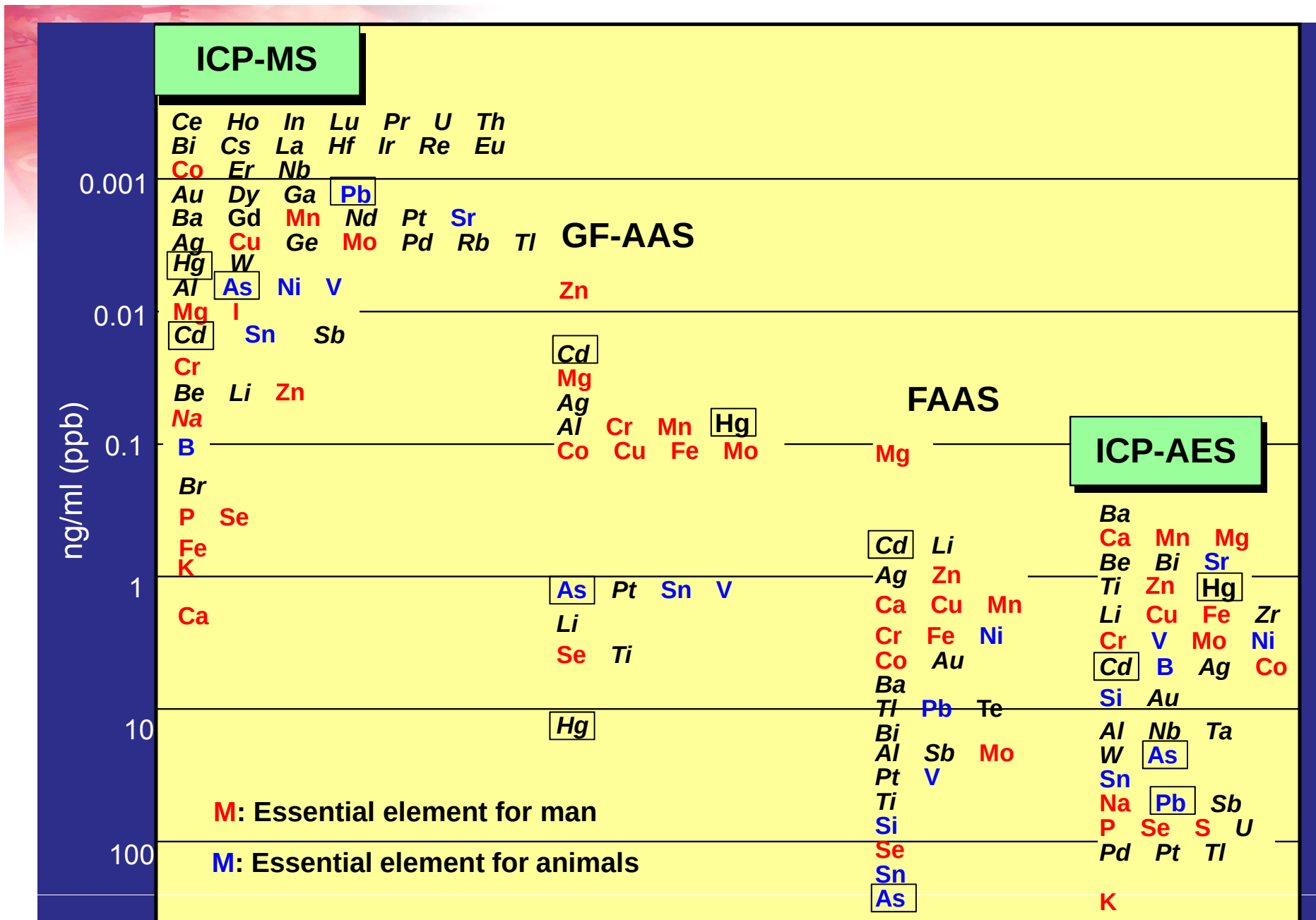


CCDイメージセンサ



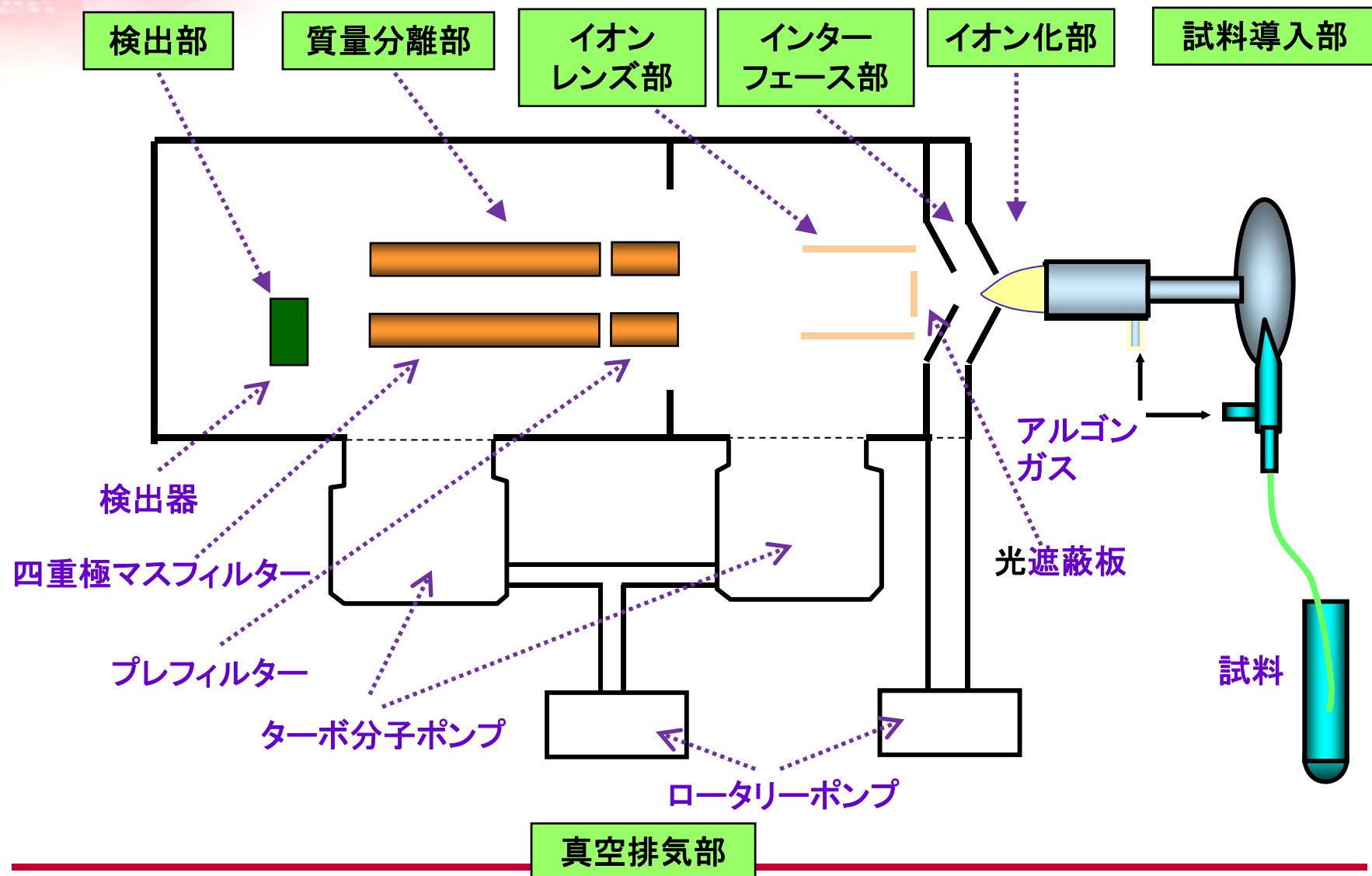
浜松ホトニクスのHPより転載





Detection Limits Obtained by Analytical Atomic Spectrometry

ICP-MSの構成図





ICP-MS

● 利 点 (ICPOESに比して)

1. 高感度
2. 幅広いダイナミックレンジ (3 ~ 6 桁)
3. 多元素定量
4. 同位体比測定
5. 単純なスペクトル
6. (クロマト等の結合による) スペシエーション

● 欠 点

1. 質量スペクトル干渉
2. マトリックス効果 (非スペクトル干渉)



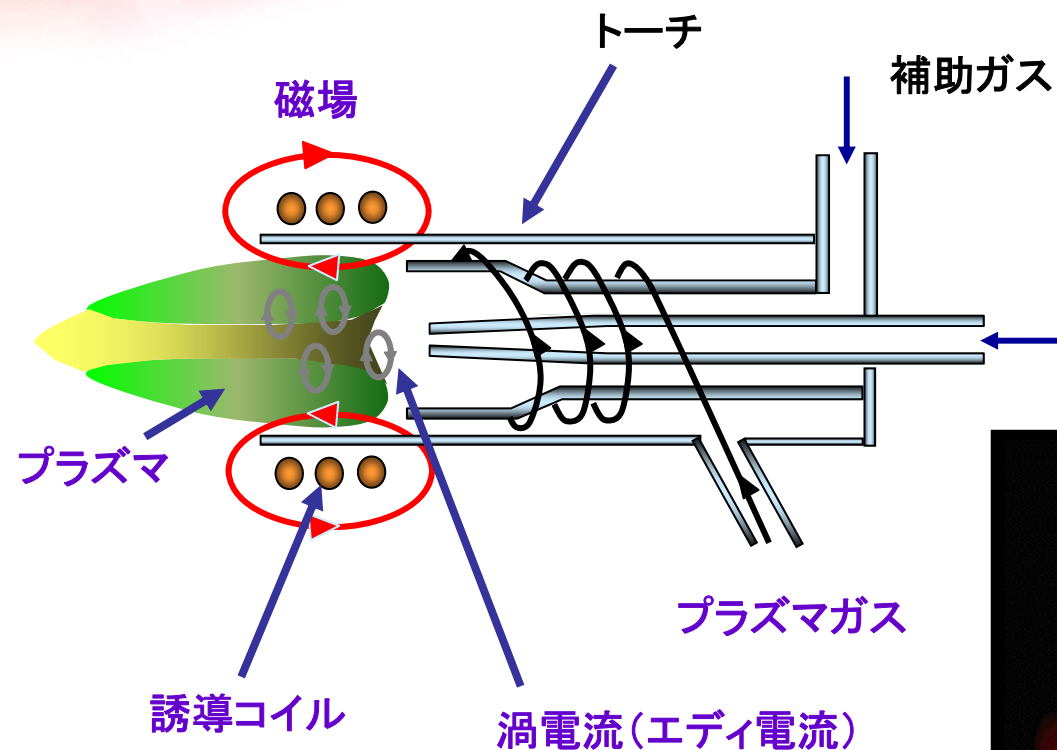
プラズマ

(plasma : 1928年 Langmuirによって命名)

高温において電離した陽イオンとそれとほぼ同数の電子、および任意数の中性分子または原子からなっており、空間電荷がほぼ0の中性電離気体

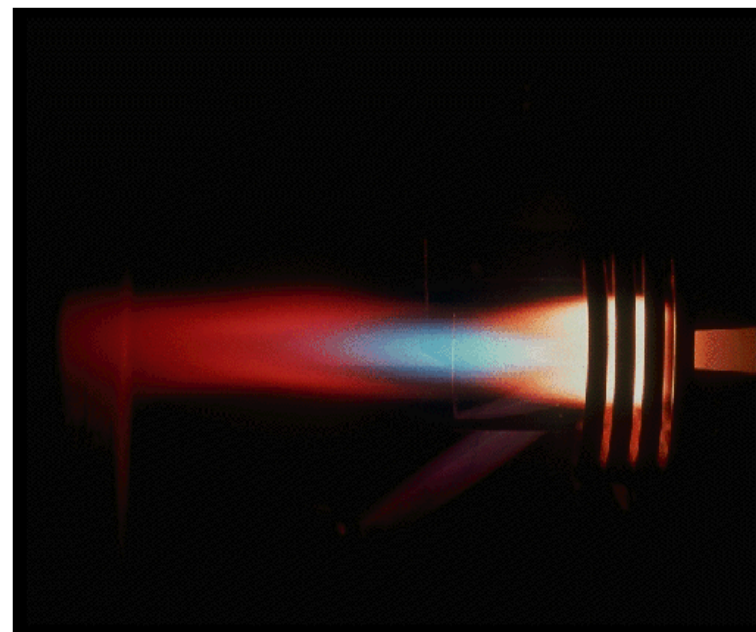
液体・気体・固体と異なった性質を持つ
第4の状態

ICPの発生



表皮効果によるドーナツ構造をとるため、中心部に試料が効率良く導入される。ただし中心部の温度は外側より低いことに注意

ネブライザーガス
+ 試料



プラズマ温度は5000 K~7000 K



分析用プラズマの分類

- エネルギー源
直流、高周波（数～数10 MHz）、マイクロ波（数 GHz）
- 点灯方式
容量結合型、誘導結合型
- 雰囲気
真空、減圧、大気圧
- ガス
アルゴンICP、窒素MIP、ヘリウムICP、酸素

ICPにおける元素のイオン化平衡

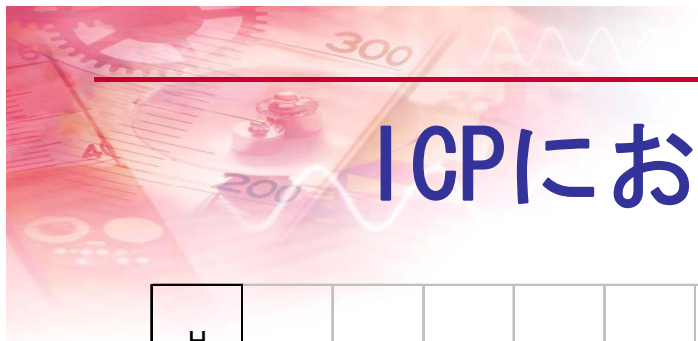
$$K = \frac{[M^+][e]}{[M]}$$



$$\frac{[M^+]}{[M]} = \frac{2}{n_e} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Q^+}{Q^0} e^{-IP / kT_i}$$

Saha の式

n_e = 電子密度、 m_e = 電子質量、 k = ボルツマン定数、 h = プランク定数、
 T_e = 電子温度、 T_{ion} = イオン化温度、 IP = Mのイオン化電位、 Q^+ , Q^0 =
イオン, 原子の電子状態の分配関数



I CPにお

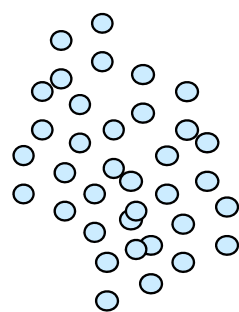
エ						
---	--	--	--	--	--	--

[illegible]

イオン化温度=7500°C、電子密度= 10^{15}cm^{-3}

Arプラズマ中でのイオン化の過程

エアロゾル



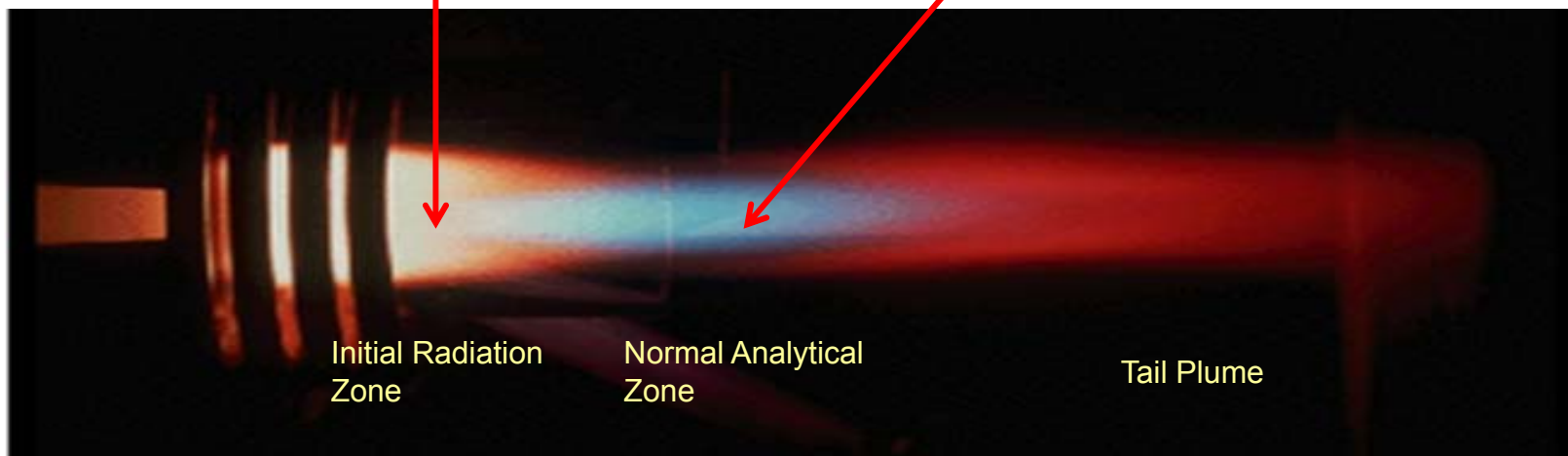
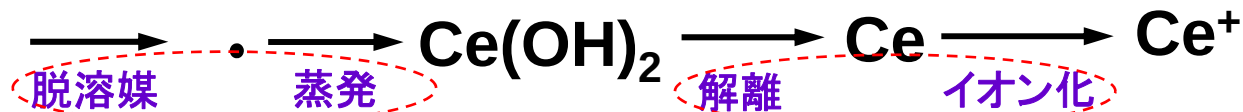
霧化

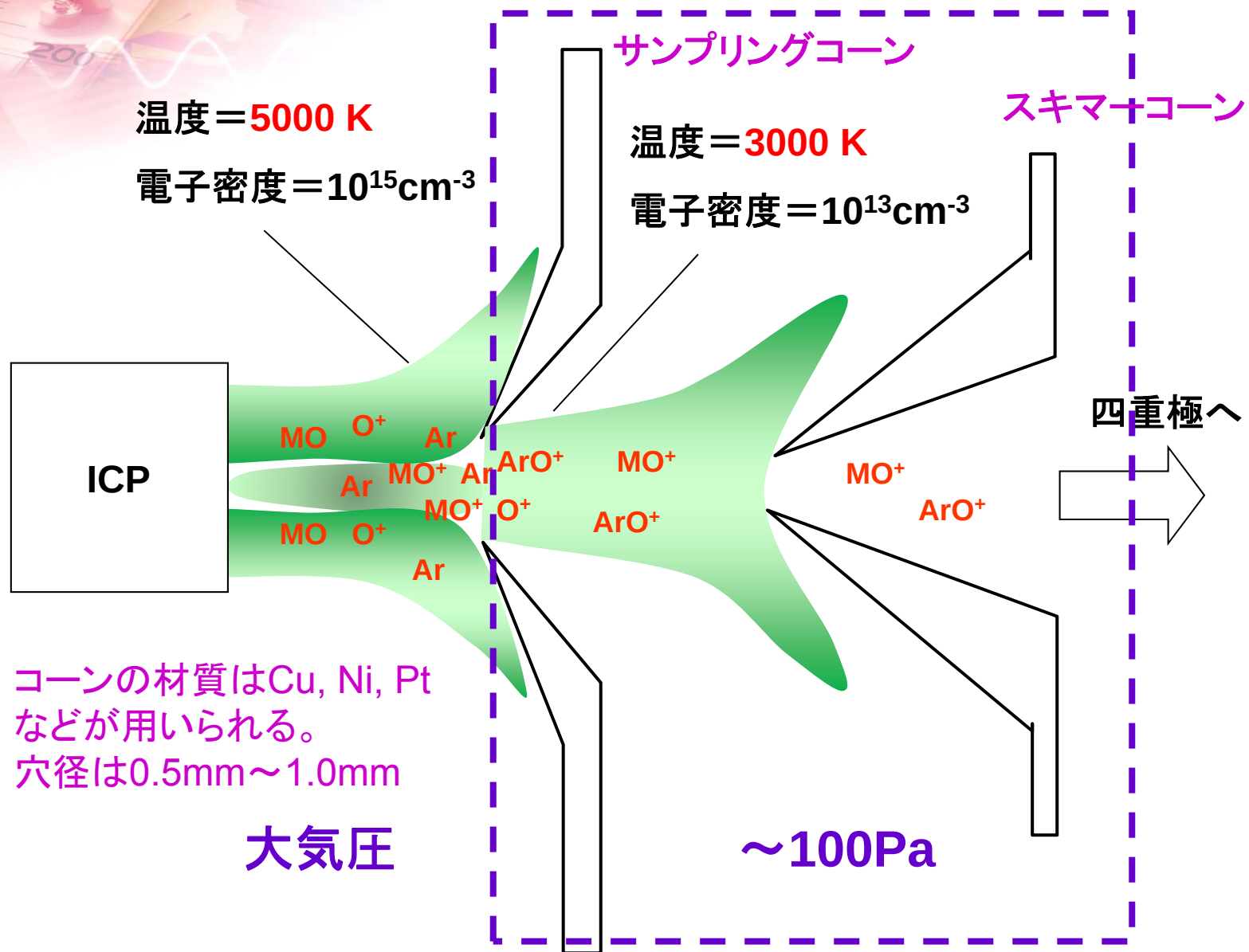
粒子

分子

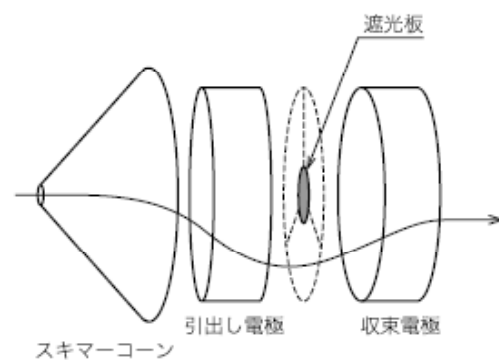
原子

イオン

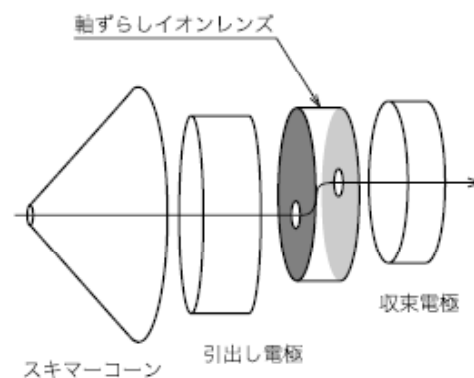




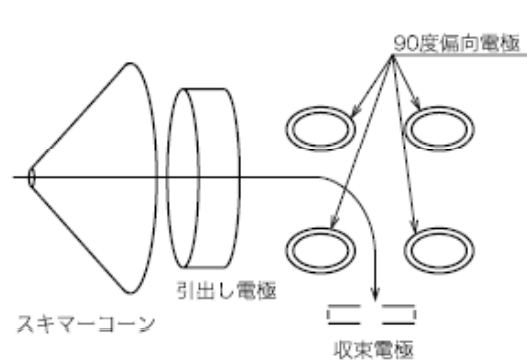
イオンレンズのいろいろ



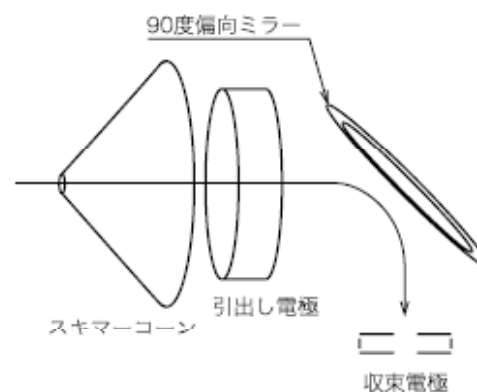
a) 遮光板遮へい装置



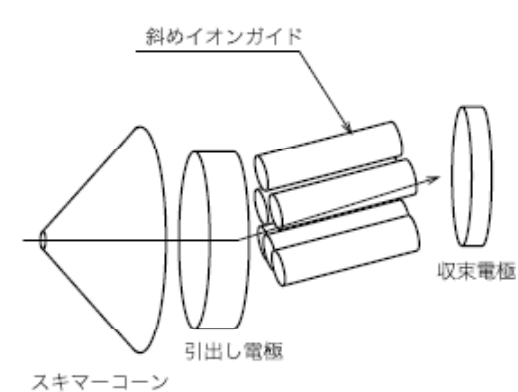
b) 軸ずらしイオンレンズ遮へい装置



c) 90度偏向電極装置



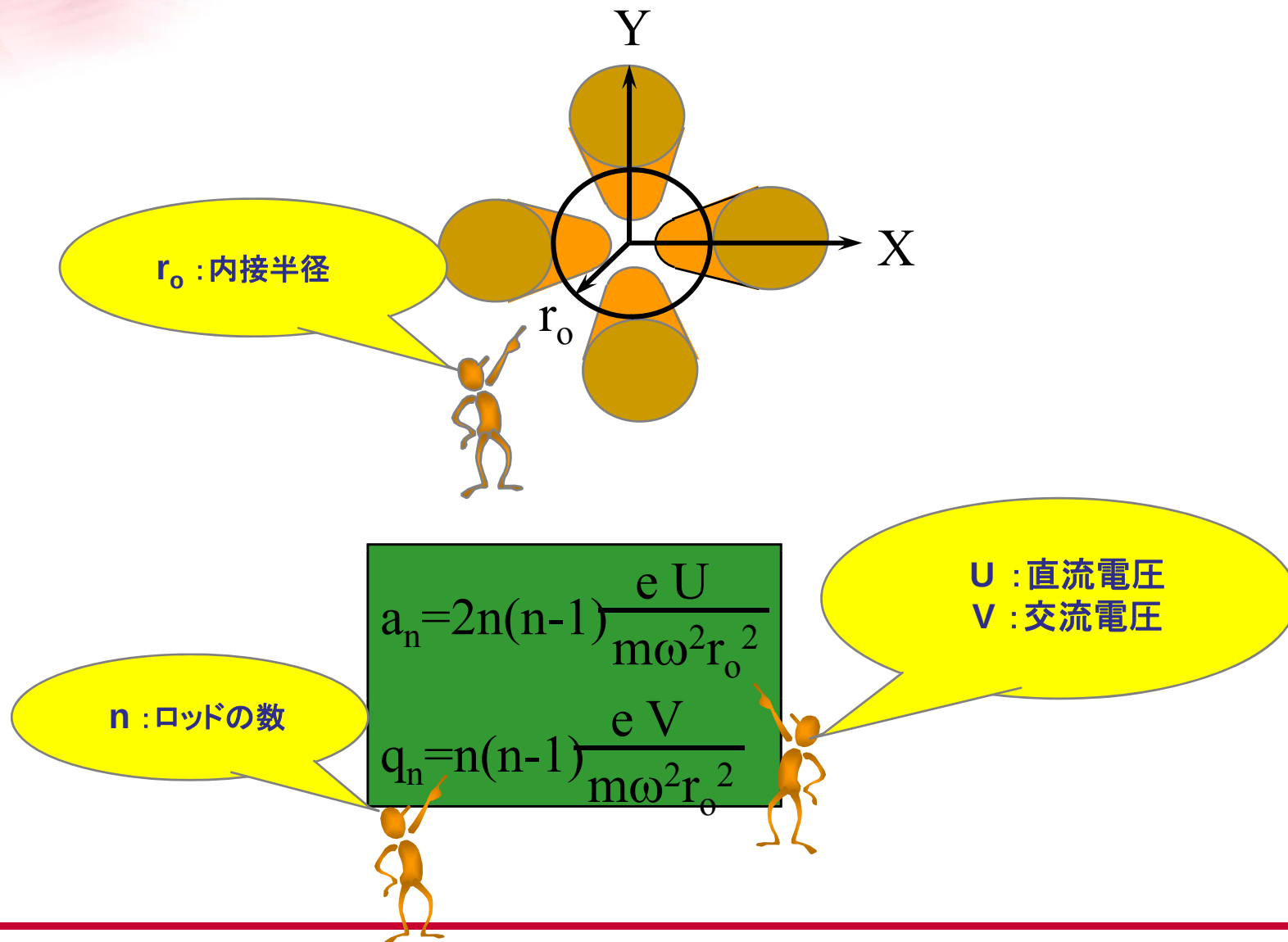
d) 90度偏向ミラー装置



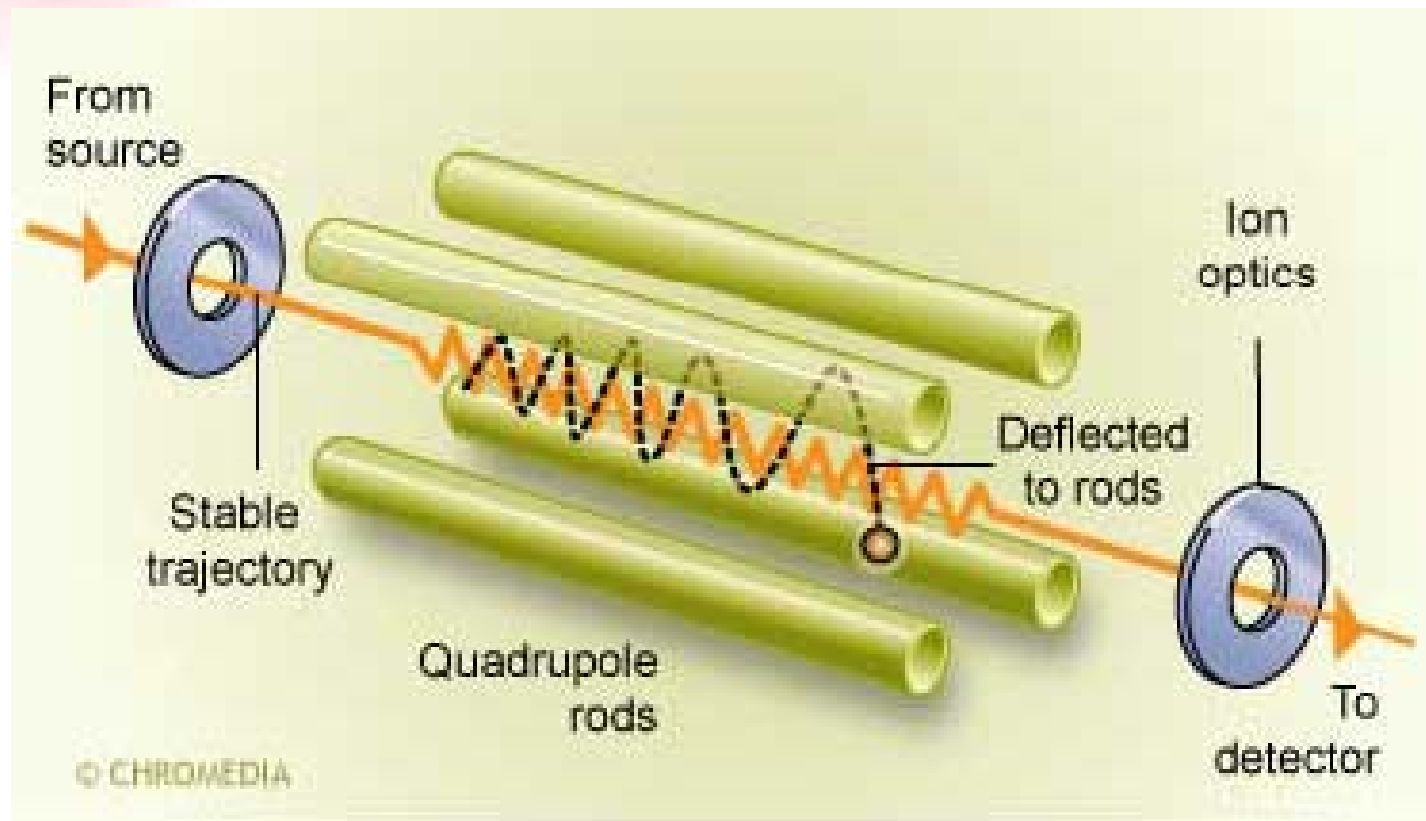
e) 斜めイオンガイド装置

高周波プラズマ質量分析通則JIS K 0133 より

四重極マスフィルターの原理



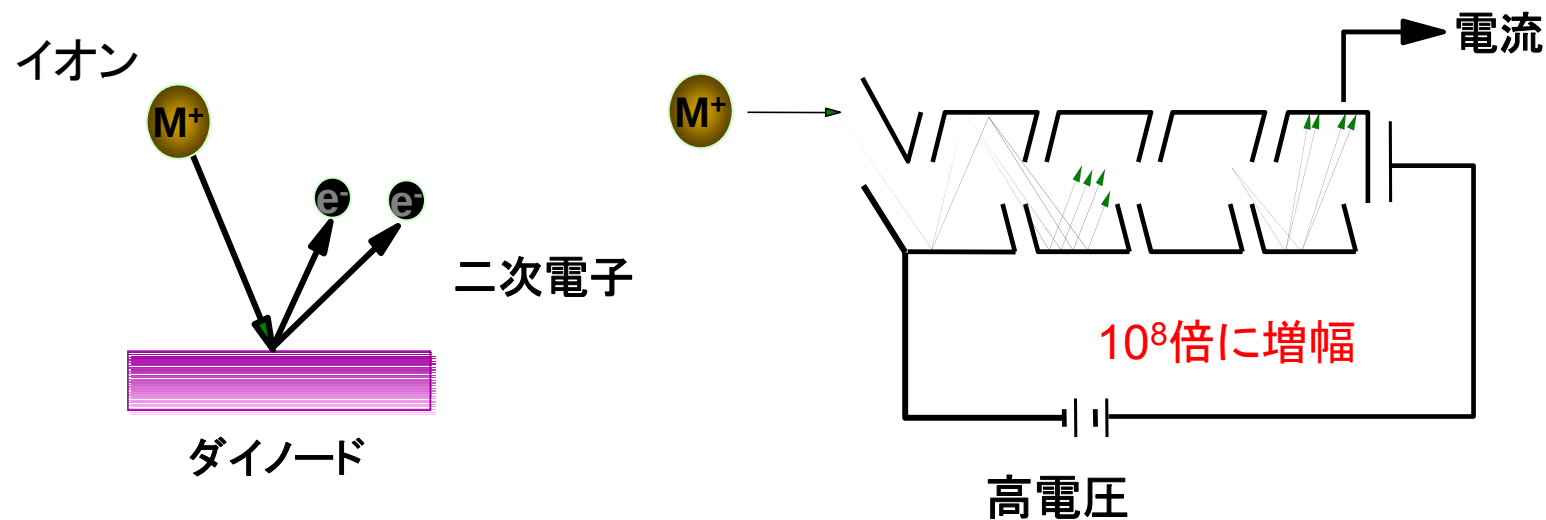
四重極内のイオンの軌道



安定領域内のイオンのみ振幅しながら通過する。
それ以外は振幅がどんどん広がり四重極外へ発散する。

<http://www.chromedia.org/chromedia> より

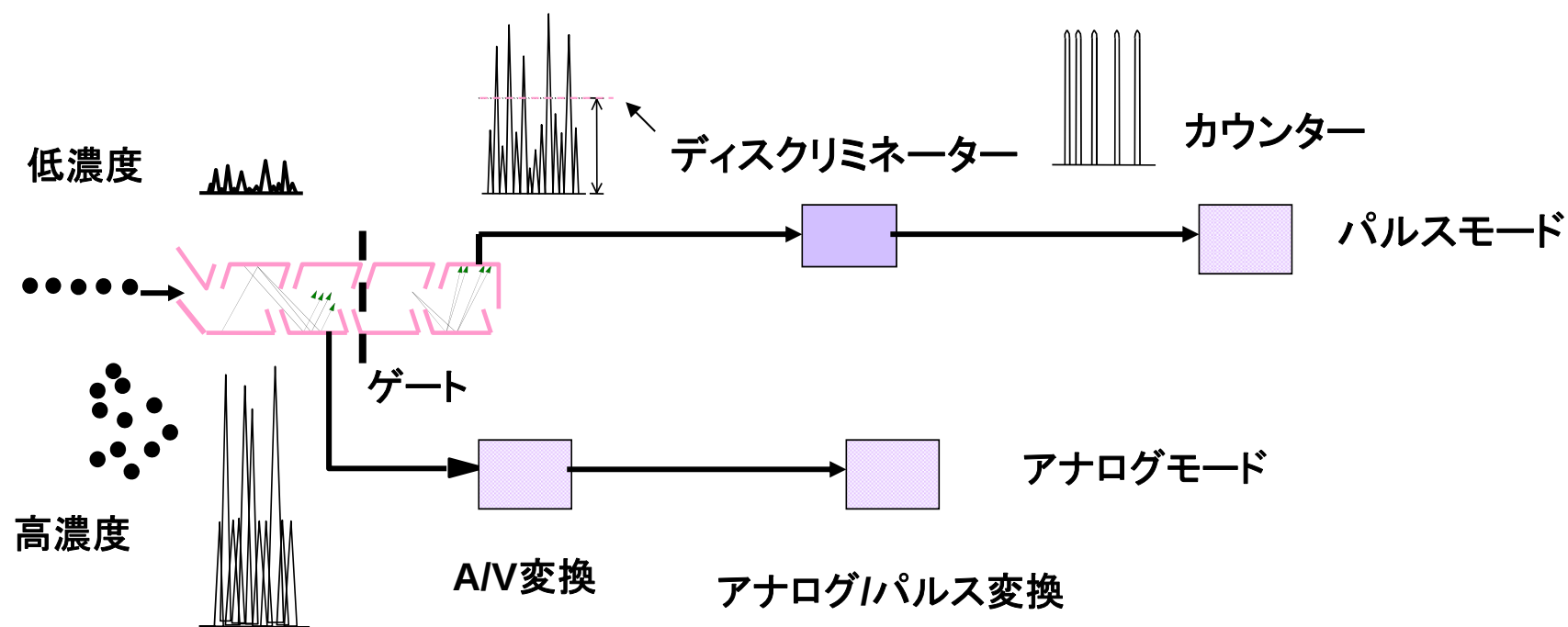
ディスクリートダイノード 二次電子増倍管



検出器の不感時間(τ)に注意！
シグナル $> 10^5$ cps

$$N_R = \frac{N_O}{1 - \tau \cdot N_O}$$

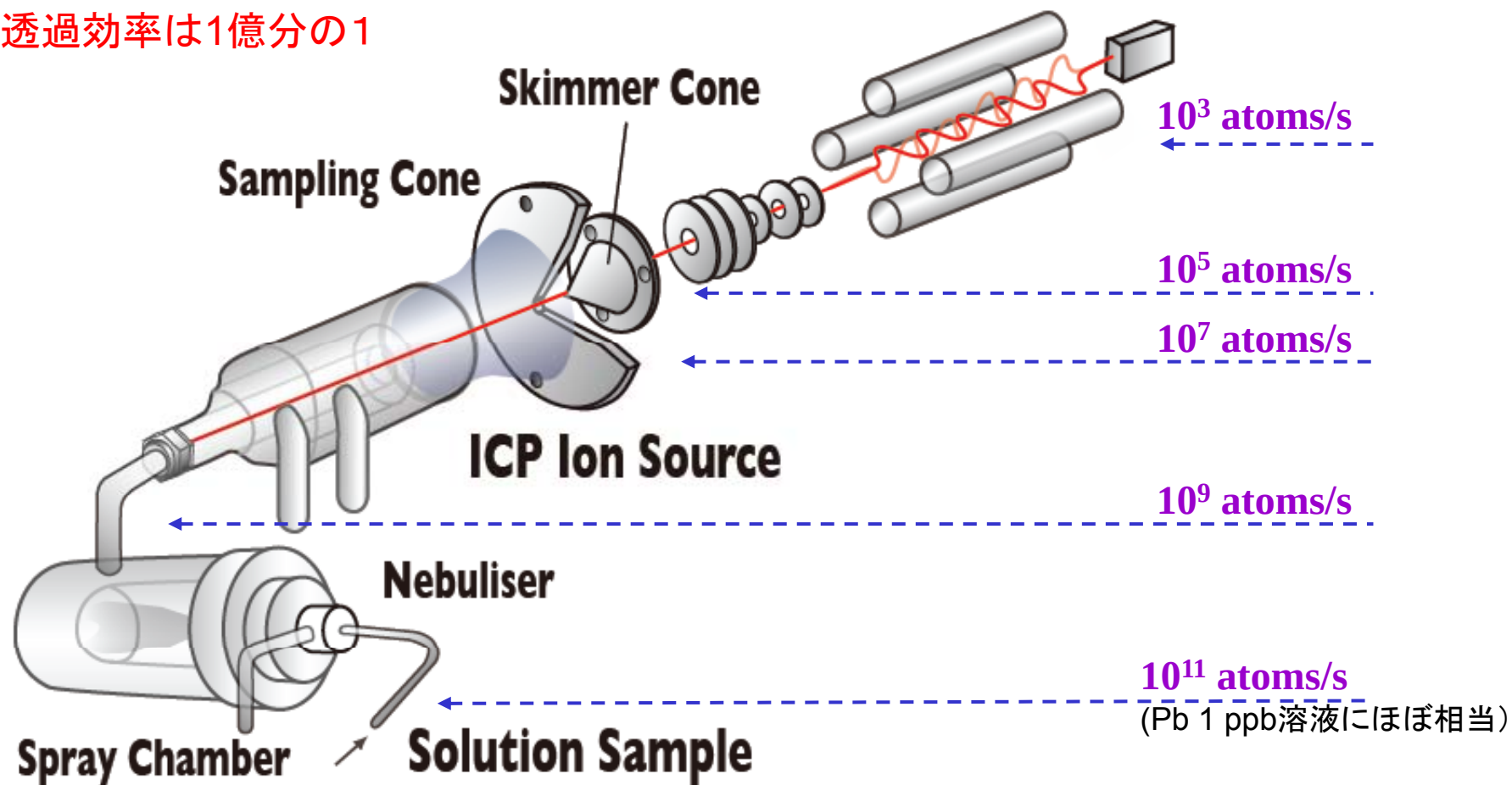
デュアル検出器の原理



検出器の直線性の正確さを確保するために、パルス→アナログへの変換係数を定期的にチェックすること！

ICP-MSにおけるイオンの透過効率

透過効率は1億分の1



<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-geochem/Home.html> より一部転載

ICP-MS(四重極型)における装置検出限界の目安(mg/L)

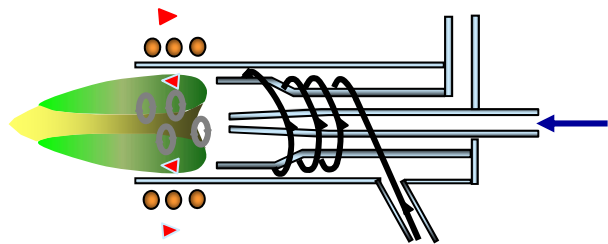
元素	質量数	装置検出限界	元素	質量数	装置検出限界
Ag	107	0.003	Mo	98	0.003
Al	27	0.006	Na	23	0.003
As	75	0.006	Nb	93	0.000 9
Au	197	0.001	Nd	143	0.002
B	11	0.09	Ni	60	0.005
Ba	138	0.002	Os	192	0.001
Be	9	0.01	P	31	0.3
Bi	209	0.000 5	Pb	208	0.001
Br	80	0.2	Pd	105	0.003
C	12	150	Pr	141	< 0.000 5
Ca	44	0.2	Pt	195	0.002
Cd	111	0.003	Rb	85	0.003
Ce	140	0.000 4	Re	187	0.000 6
Cl	35	10	Rh	103	0.000 8
Co	59	0.000 9	Ru	102	0.002
Cr	52	0.02	S	32	70
Cs	133	0.000 5	Sb	122	0.001
Cu	63	0.003	Sc	45	0.02
Dy	161	0.001	Se	78	0.06
Er	166	0.000 8	Si	28	0.7

ICP-MS(四重極型)における装置検出限界の目安(mg/L)

Eu	153	0.000 7	Sm	147	0.001
F	19	10 000	Sn	119	0.002
Fe	57	0.2	Sr	88	0.000 8
Ga	69	0.001	Ta	181	0.000 6
Gd	155	0.002	Tb	159	< 0.000 5
Ge	73	0.003	Te	128	0.01
Hf	178	0.000 6	Th	169	< 0.000 5
Hg	200	0.004	Ti	48	0.006
Ho	165	< 0.000 5	Tl	205	0.000 5
I	127	0.008	Tm	169	< 0.000 5
In	115	< 0.000 5	U	238	< 0.000 5
Ir	193	0.000 6	V	51	0.002
K	39	0.2	W	184	0.001
La	139	0.000 5	Y	89	0.000 9
Li	7	0.002	Yb	173	0.001
Lu	175	< 0.000 5	Zn	65	0.003
Mg	24	0.007	Zr	91	0.004
Mn	55	0.002	1 mg/mL あたり10000 cps		

高分解能型ではおおよそ100倍

ICP-MSで利用される 種々の試料導入法



- 溶液連続噴霧(ネブライザー)法
同軸型、バビントン、クロスフロー、微量

- 超音波噴霧法

- 電氣的加熱蒸発法
グラファイト炉、金属フィラメント

- 水素化物発生法

- 固体試料直接分析法
電極蒸発法、レーザー蒸発法、スパーク法

- クロマトグラフ法
HPLC、GC

- キャピラリー電気泳動法

- フローインジェクション法

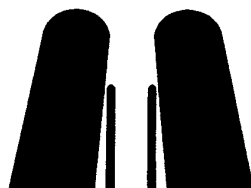
同軸ネブライザー



Type A

ノーマル

(B)



Type C

高塩濃度

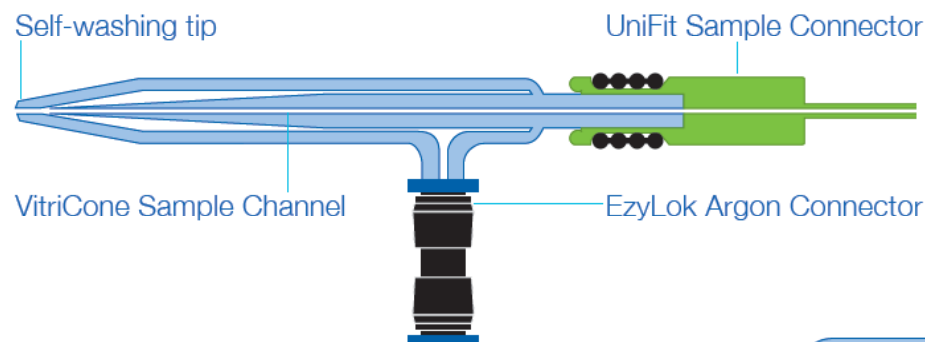


Type K

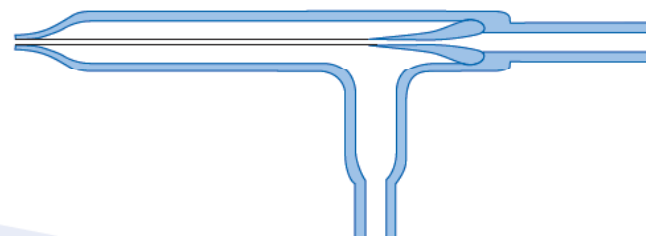
低アルゴン消費

現在でも最も一般的に使用される

用途別
一体型 or コネクター
素材(ガラス or 樹脂)
流量(0.02~2 mL/min)



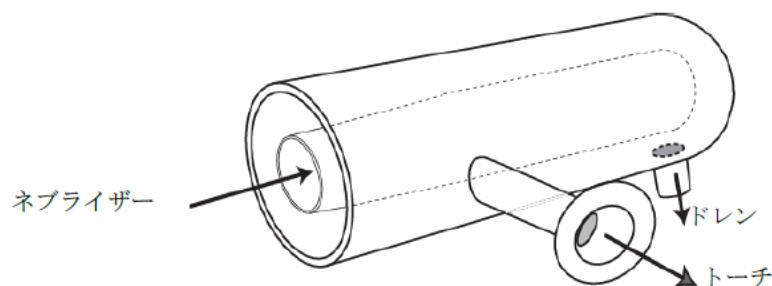
従来型



一体型から取り外し型へ
低いDead volume
目詰まりが起こりにくい

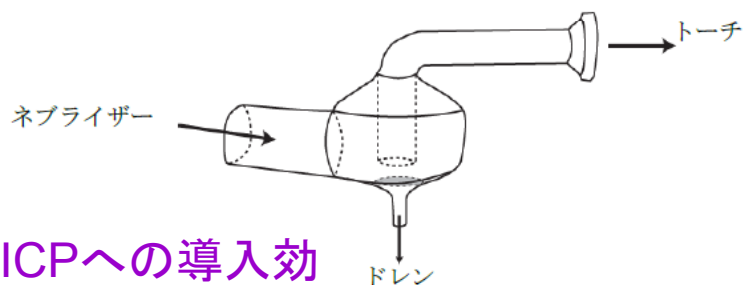
Glass Expansion社の技術資料より

スプレーチャンバーのいろいろ



霧の選別能力
が高い。分析精
度が良い。

スコット型(ダブルパス型)

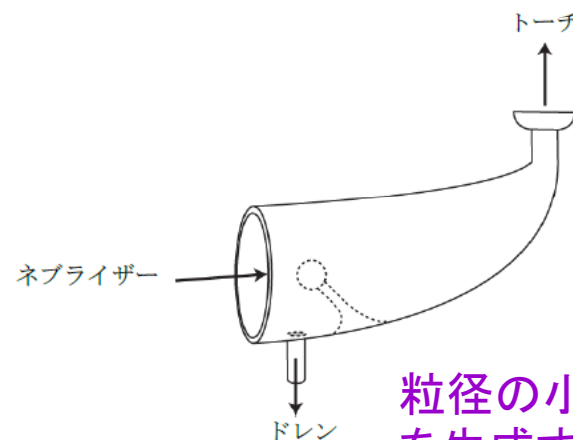


ICPへの導入効
率が良く、感度
が高い。

サイクロン型

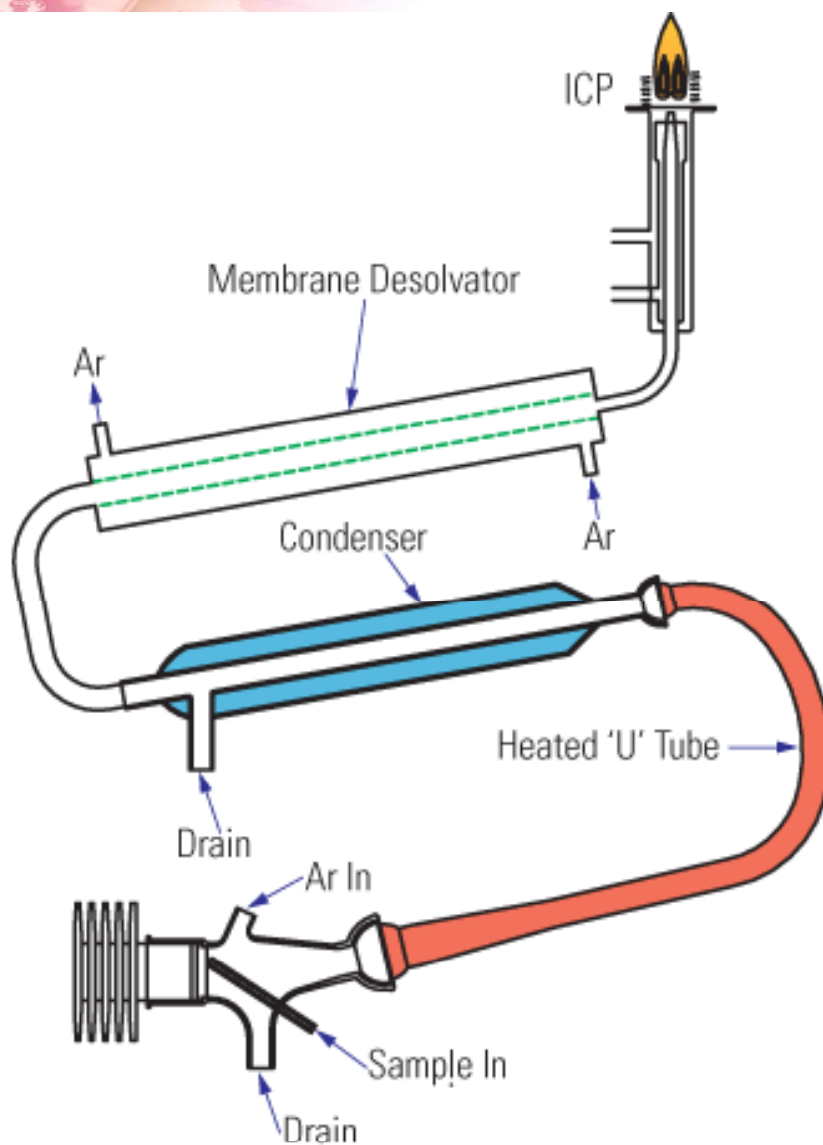
霧の選別 ($>5 \sim 20 \mu\text{m}$ はドレンへ)
とICPへの輸送、ガスの揺らぎに対
する緩衝効果

コニカル型



粒径の小さい霧
を生成する。

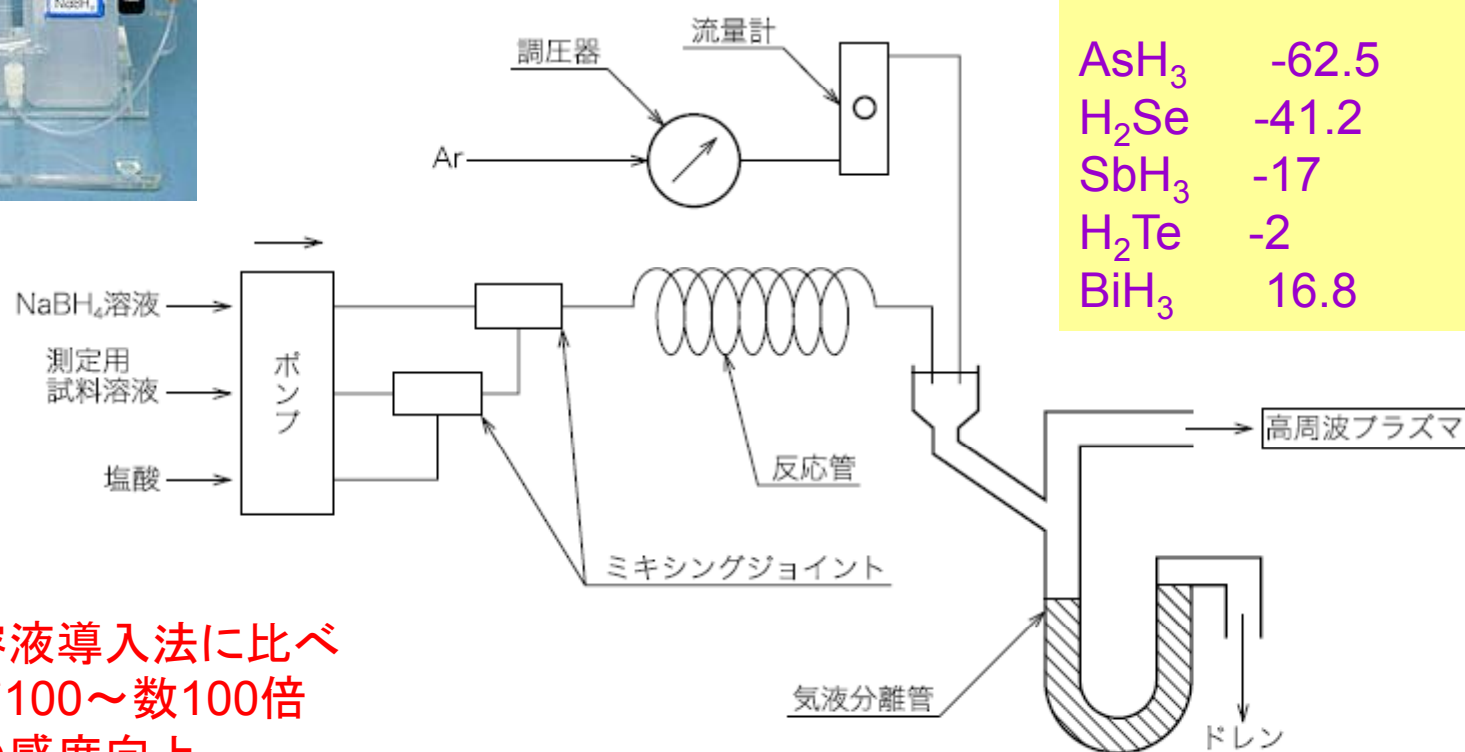
高周波プラズマ質量分析通則JIS K 0133 より



超音波ネブライザーと 脱溶媒システムの例

CETAC社の資料より

水素化物発生装置の例

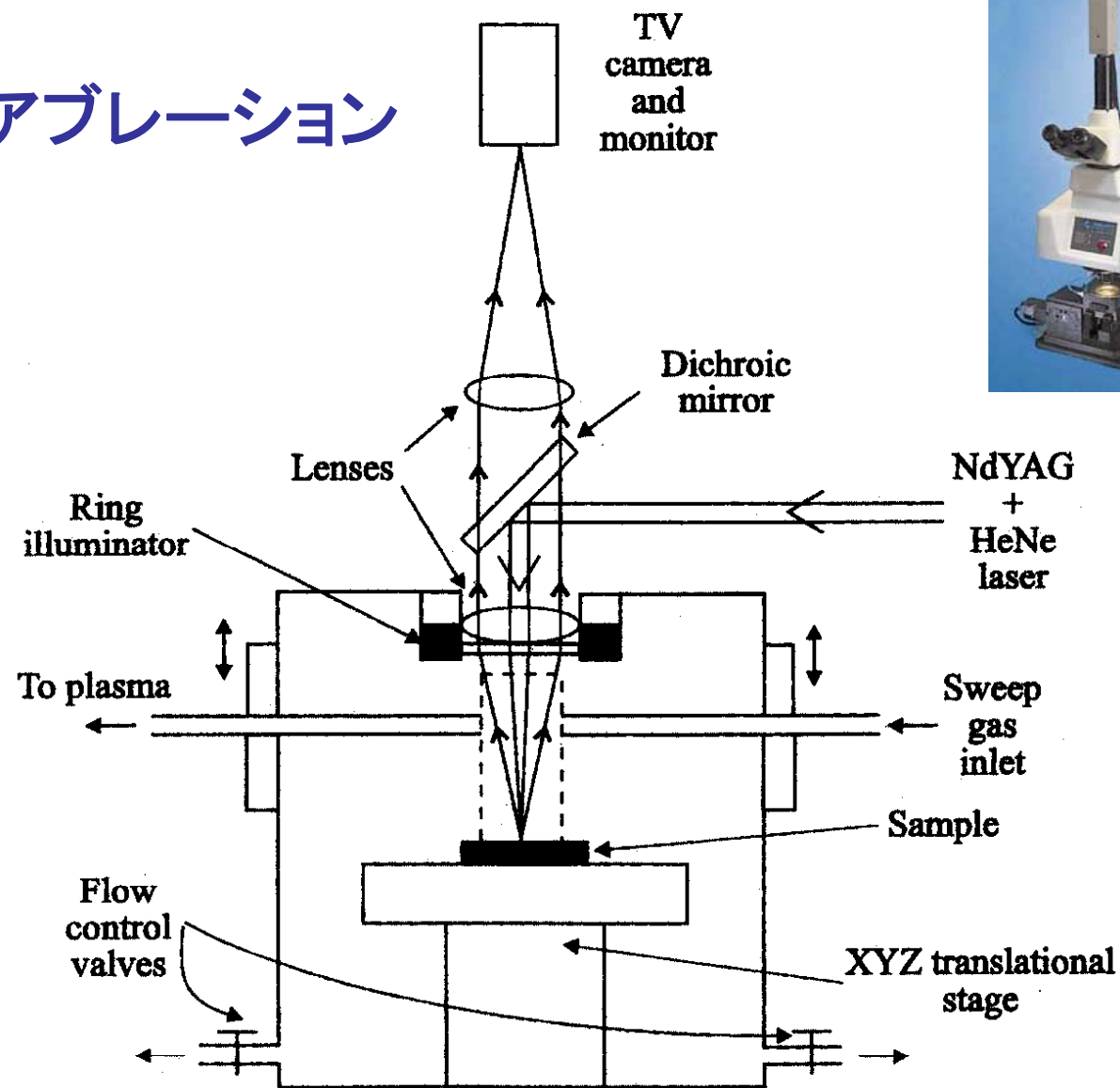


	b.p. (°C)	I.P(eV)
AsH ₃	-62.5	9.81
H ₂ Se	-41.2	9.75
SbH ₃	-17	8.64
H ₂ Te	-2	9.00
BiH ₃	16.8	7.29

溶液導入法に比べて100～数100倍の感度向上

図 20－水素化物発生装置（一例）

レーザーアブレーションシステム



試料導入系の特徴まとめ

導入形態分類	利点	欠点	適用試料
溶液試料導入 ネブライザー法 超音波ネブライザー法 微量試料導入ネブライザー法 フローインジェクション法 クロマトグラフ結合法	安定導入 脱溶媒,高導入効率 高導入効率,低メモリー効果 低メモリー効果 化学形態 ,マトリックス分離	低導入効率 メモリー効果 酸化物増大 低精度 マトリックス効果	全般 全般 全般, 生体試料 全般 生体,食品,海水試料
固体試料導入 電気加熱気化導入法 レーザーアブレーション法 アーク・スパーク法 スラリー法	脱溶媒,マトリックス分離 直接分析 ,局所分析 直接分析, 微細粉末の直接分析	低精度 低精度, マトリックス効果 マトリックス効果 スペクトル干渉	Fe,Pの分析,生体,食品, 海水試料 地質試料,セラミックス, 鉄鋼試料 鉄鋼試料 地質試料,ガラス試料
気体試料導入 水素化物発生法 ガスクロマトグラフ法	高導入効率,マトリックス分離 化学形態分析	適用元素少	As,Se,Sb,Ge,Snの分析



ICP-MSにおける最適条件の決め方

○ICP-MSの装置構成

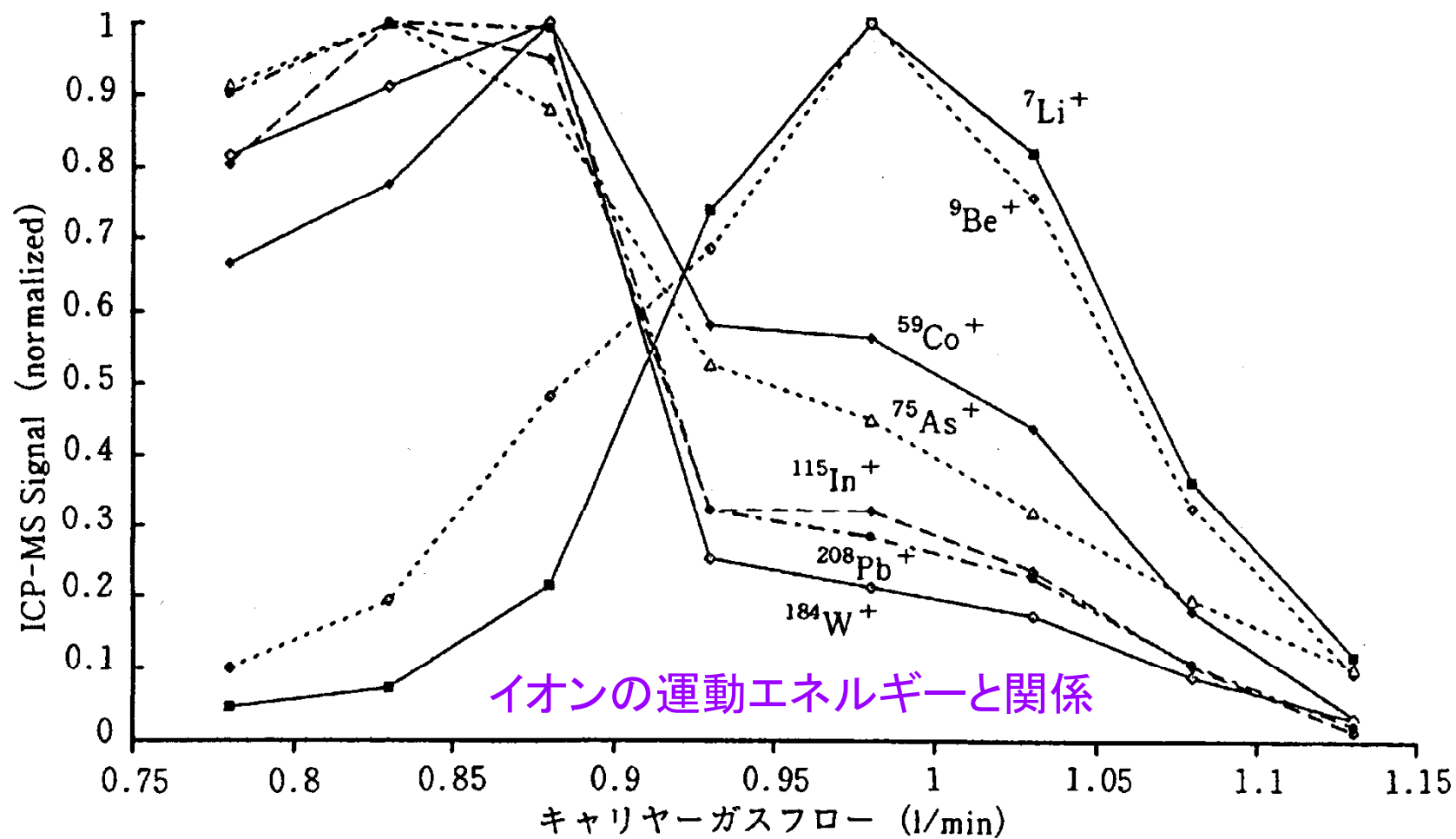
○分析装置の最適化

a)質量軸、b)分解能、c)感度および酸化物イオン、二価イオン、d)装置検出限界、e)装置安定性、f)検量線の直線性

○分析条件の最適化

a)スペクトル干渉と質量数の選択

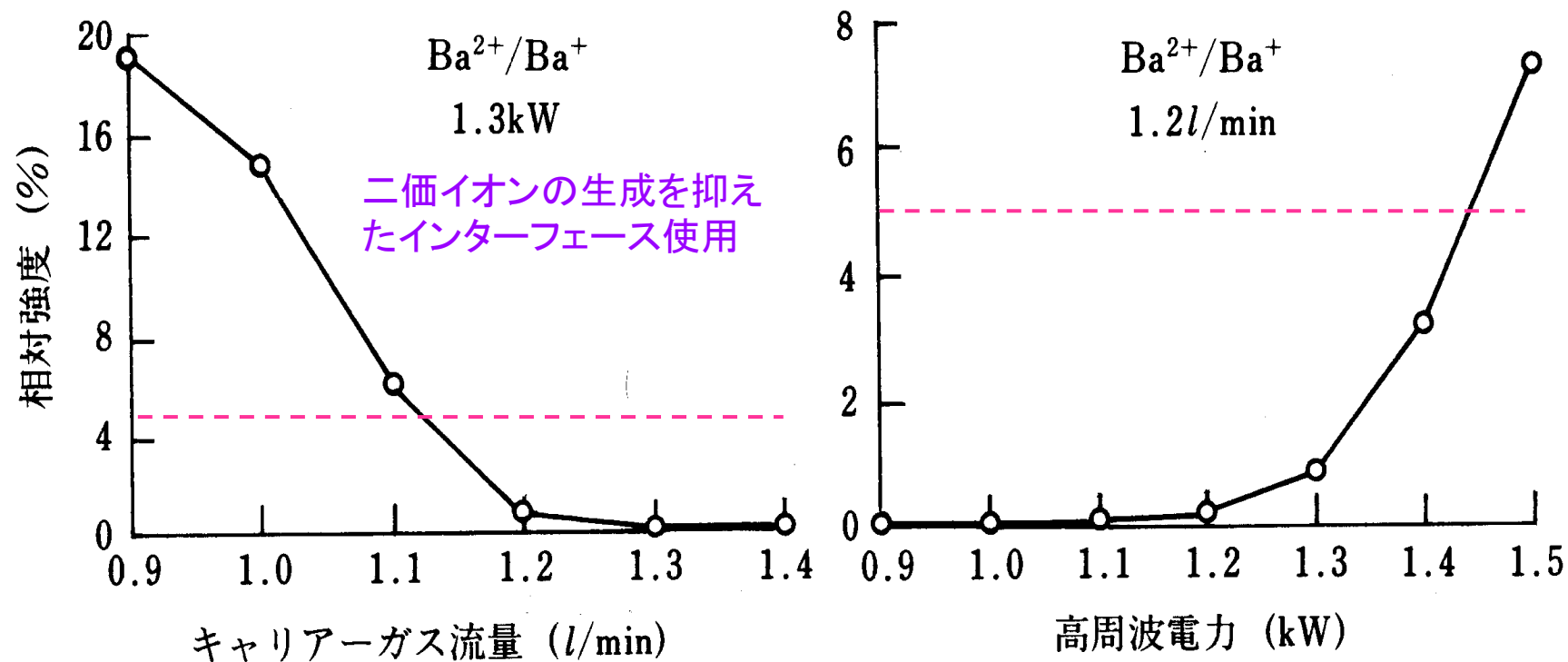
b)非スペクトル干渉と定量法を選択



RF 1400 W, サンプルング深さ 12 mm

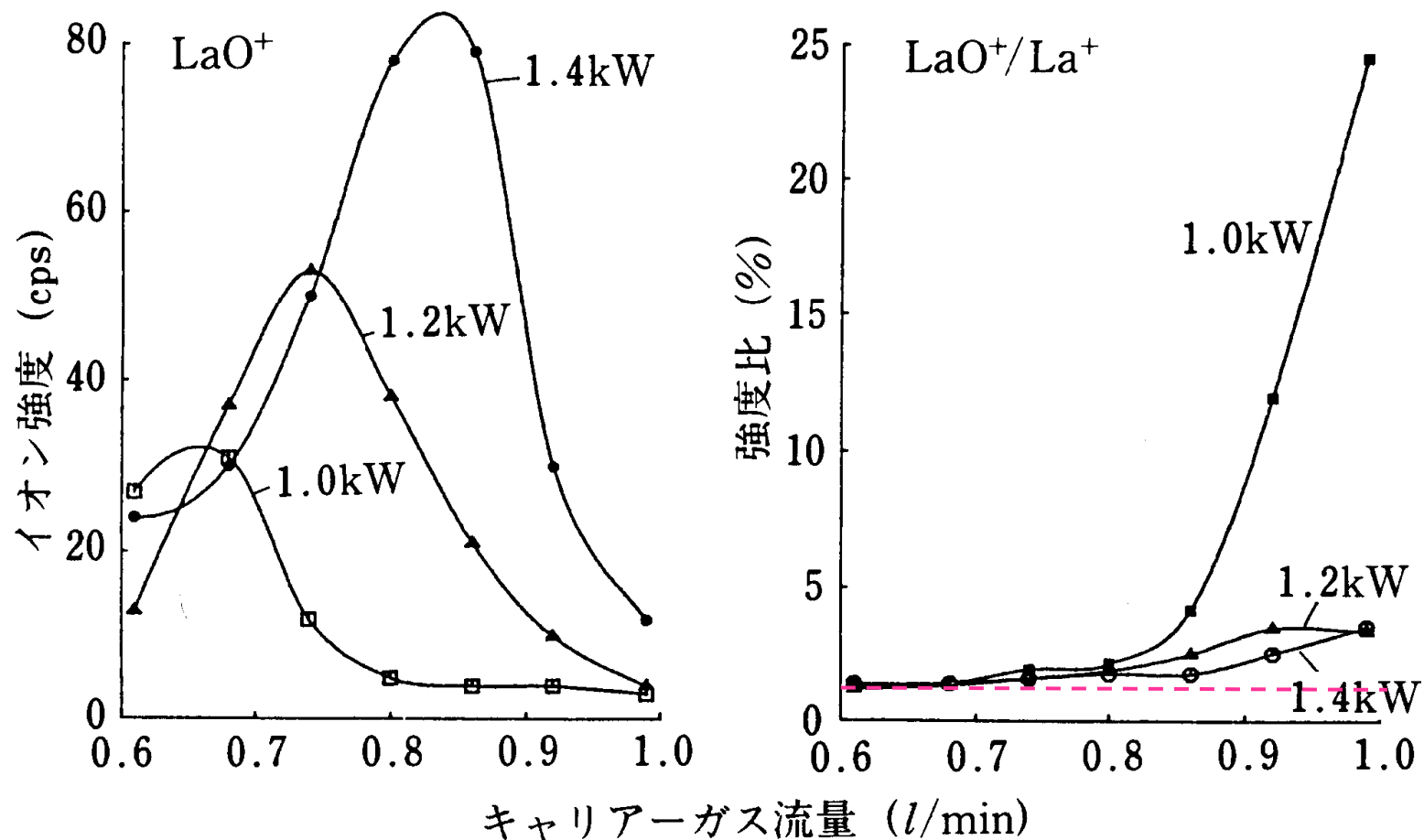
ICP操作条件の各パラメーターに対する、感度の応答特性

$\text{Ba}^{2+}/\text{Ba}^+ < 10 \%$, $\text{Ce}^{2+}/\text{Ce}^+ < 5 \%$



ICP操作条件の各パラメーターに対する、二価イオン生成比の応答特性

$\text{BaO}^+/\text{Ba}^+ < 1\%$, $\text{CeO}^+/\text{Ce}^+ < 1\%$



ICP操作条件の各パラメーターに対する、酸化物イオン生成比の応答特性



ICP-MS

● 利 点 (ICP-OESに比して)

1. 高感度
2. 幅広いダイナミックレンジ
3. 多元素定量
4. 同位体比測定
5. 単純なスペクトル
6. (クロマト等の結合による) スペシエーション

● 欠 点

1. 質量スペクトル干渉
2. マトリックス効果 (非スペクトル干渉)



ICP-MSにおける分析上の問題点

■ 非スペクトル干渉

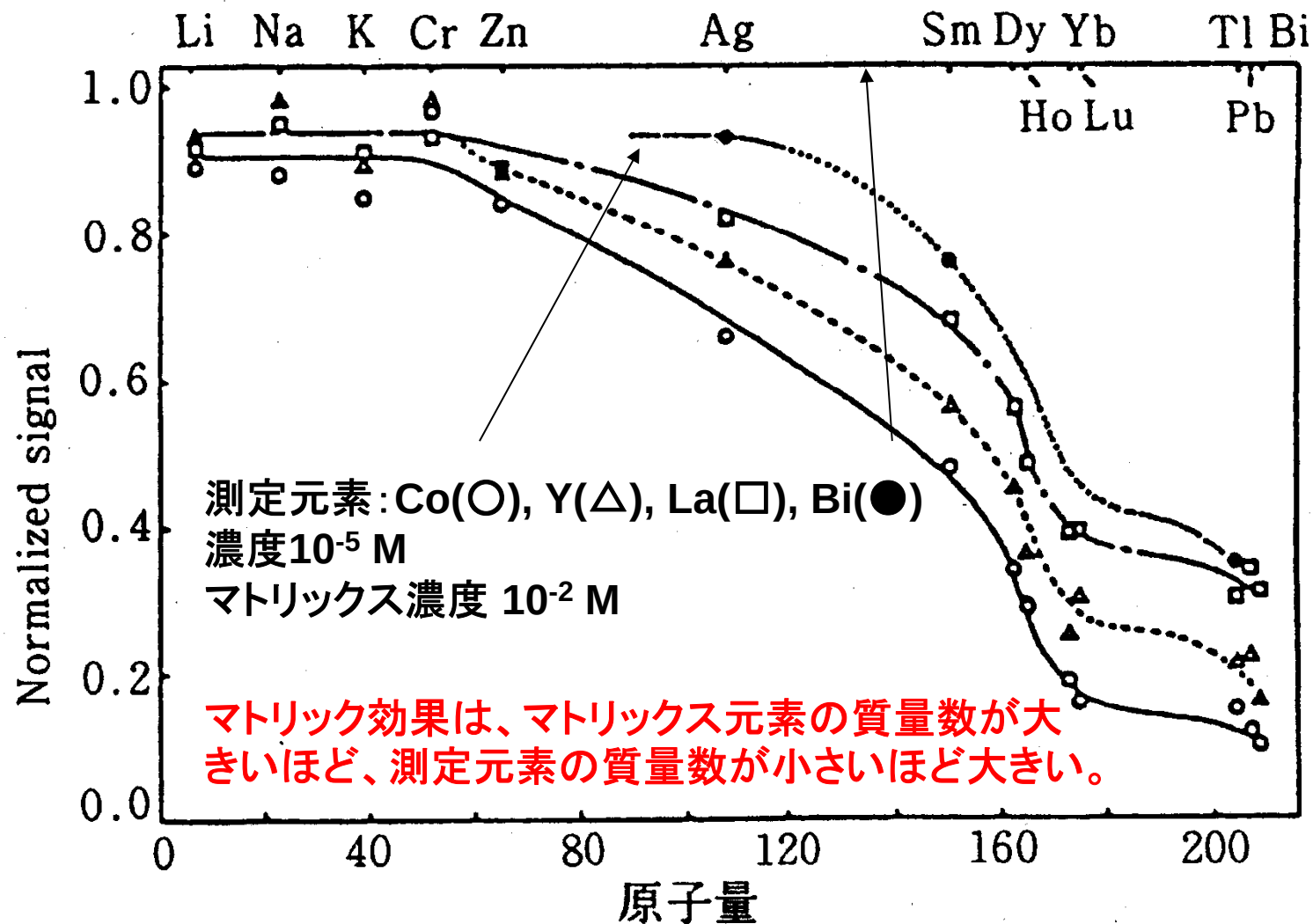
共存元素が大量(数100ppm以上)に存在する場合、微量元素のシグナルが共存しない時に比べて増感または減感すること

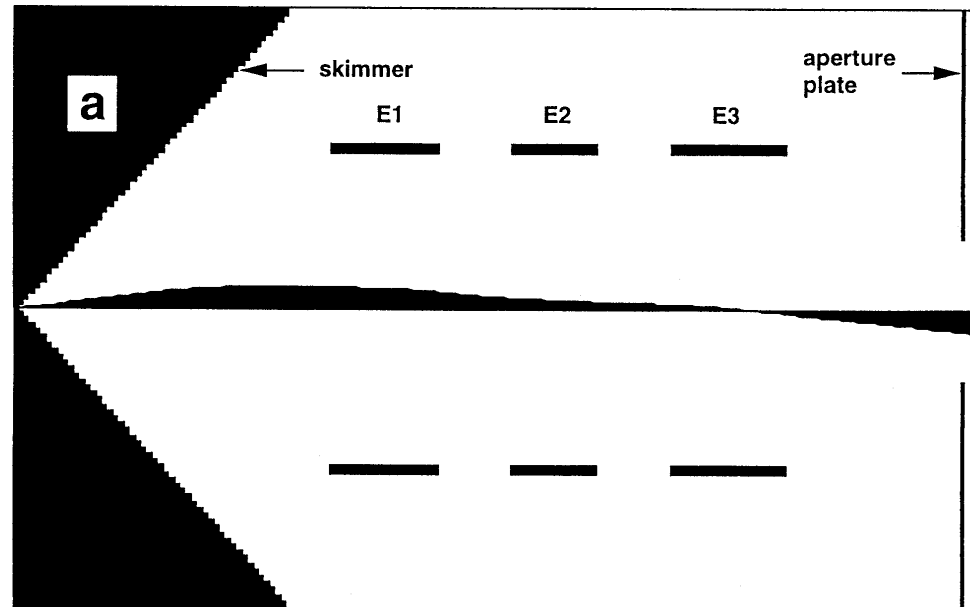
○溶媒の粘性に起因(物理干渉)

○共存元素(マトリックス)の質量・IP依存性

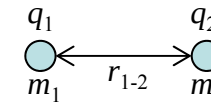
非スペクトル干渉の大きさは、未知試料に対して一定量の測定対象元素を添加し、その回収率から推定する。

マトリックス効果の測定例

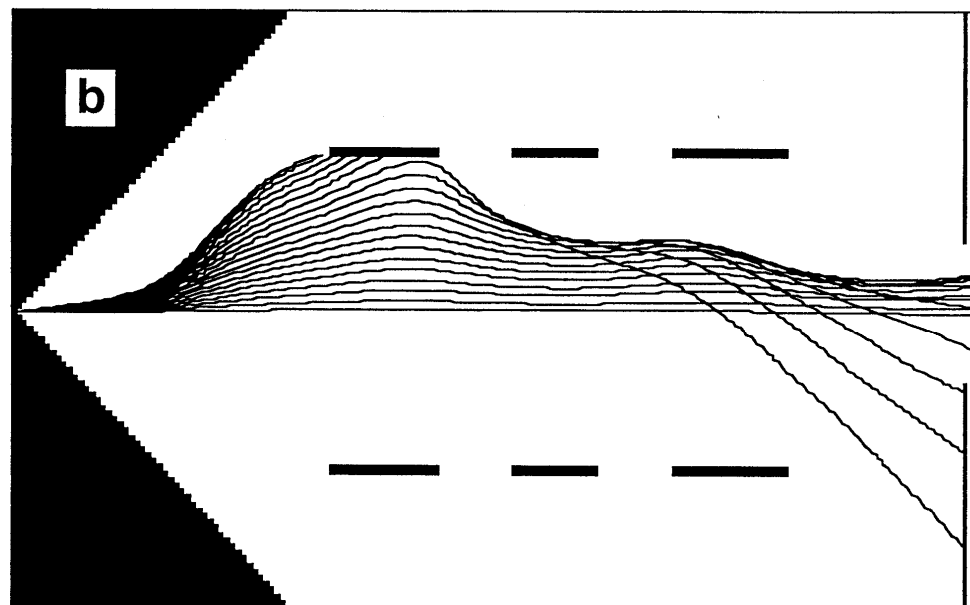




空間電荷効果を
考慮しない場合



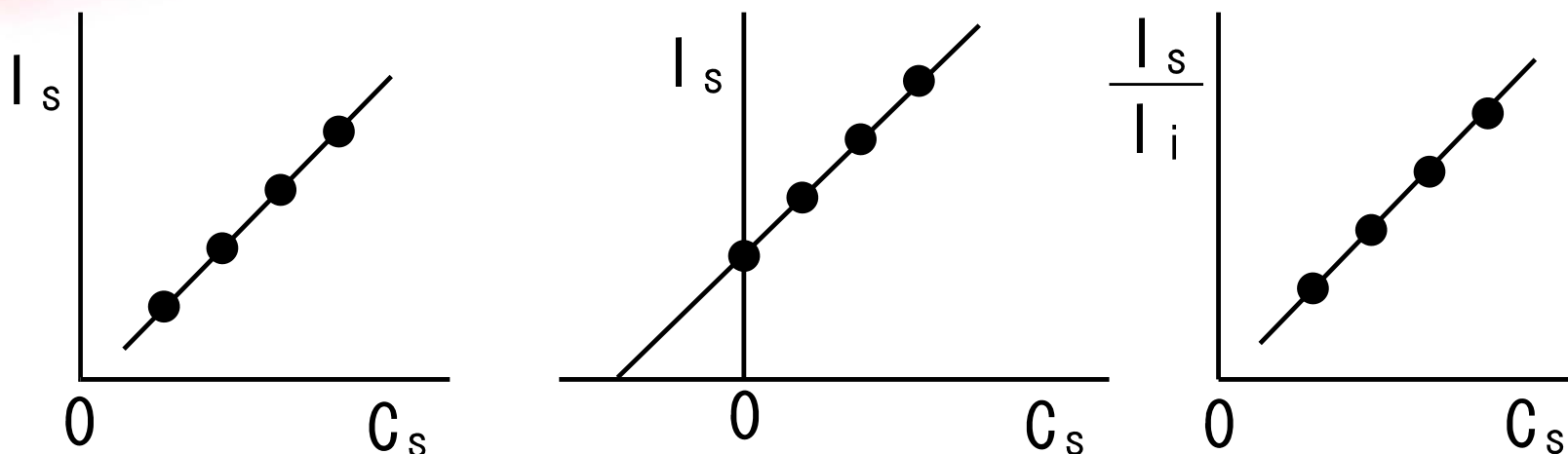
$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = k \frac{q_1 q_2}{(r_{1-2})^2}$$



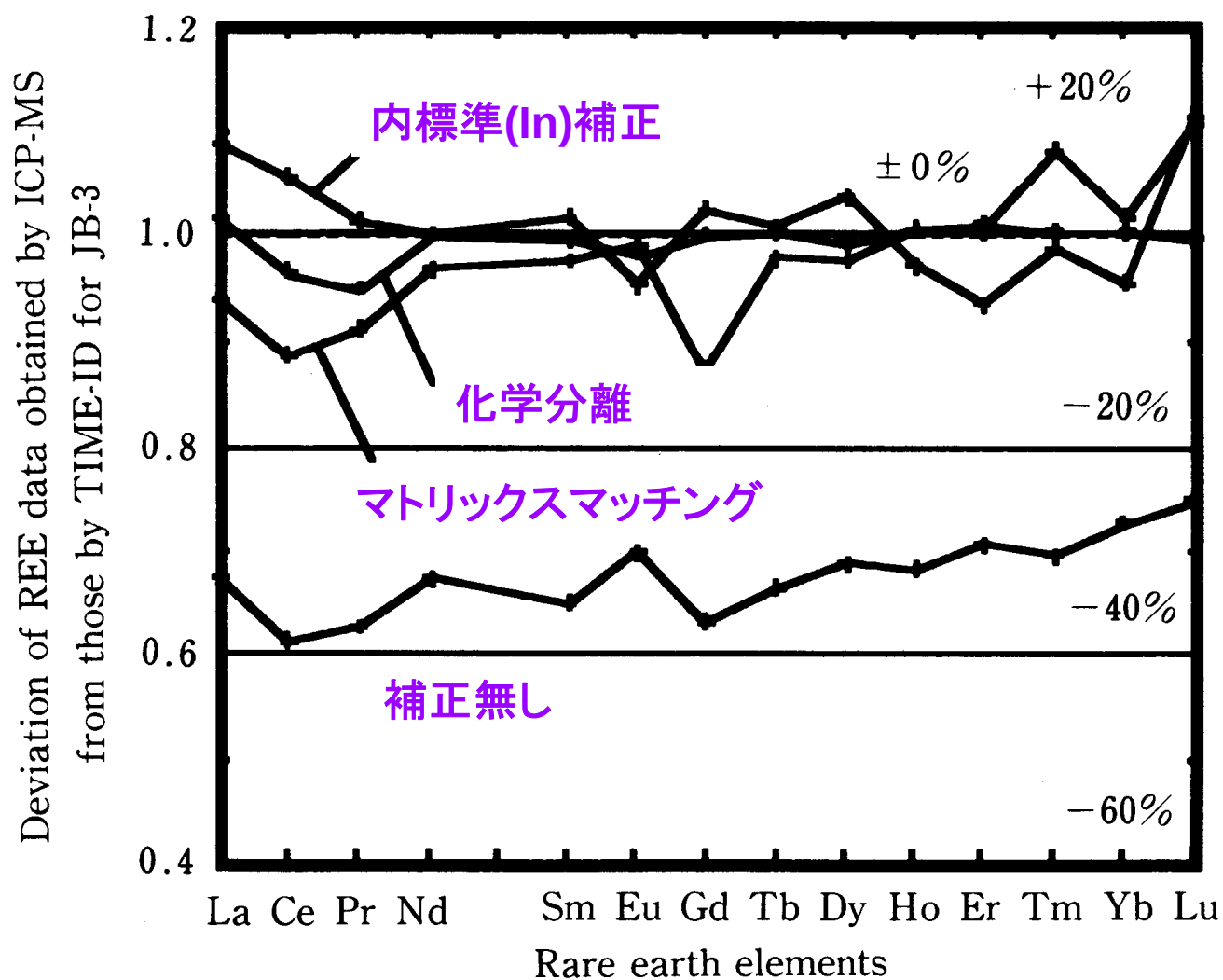
空間電荷効果を
考慮した場合

クーロン反発力のため、
軽い元素の方が
速く飛ばされる

ICP-MSにおける定量法



	検量線法	標準添加法	内標準法
	標準液による検量線と単純比較	試料溶液に標準液を添加（ブランクは別調製）	検量線液に一定量の内標準元素を添加
利点	調製が単純 幅広い直線範囲	マトリックス効果の補正	マトリックス効果の補正、経時変化の影響無
欠点	マトリックス試料には適用不可、回収率	調製が煩雑 適正添加量を考慮	内標準元素の選択基準、複数元素が必要



ICP-MSによる希土類の定量結果

内標準元素の選択基準

	Be	Co	Y	Rh	Cd	In	Cs	Tl	Bi
質量数	9	59	89	103	114	115	133	205	209
試料中濃度	○	○	○	○	△	○	○	△	○
単核種	○	○	○	○	×	△	○	△	○
分光干渉	△	×	△	○	△	△	△	○	○
質量域	△	○	○	△	×	△	○	○	△

○試料に含まれていない

○イオン化ポテンシャルが近い(ICP内でのイオン化干渉)

●質量数が近い(空間電荷効果や拡散効果の影響)

○単元素 or 複数元素



内標準元素の選択基準

○試料に含まれていない

○イオン化ポテンシャルが近い

ICP内でのイオン化干渉

●質量数が近い

空間電荷効果や拡散効果の影響

○単元素 or 複数元素

Be, In, Cd, Sc, Y, Bi etc...



ICP-MS

● 利 点 (ICP-OESに比して)

1. 高感度
2. 幅広いダイナミックレンジ
3. 多元素定量
4. 同位体比測定
5. 単純なスペクトル
6. (クロマト等の結合による) スペシエーション

● 欠 点

1. 質量スペクトル干渉
2. マトリックス効果 (非スペクトル干渉)

ICP-MSにおける分析上の問題点

- スペクトル干渉

質量スペクトル上で目的元素の質量数と同じところに何らかの妨害イオンが重なる

○アルゴンガスに起因するもの (ArX^+)

○溶媒(酸・水など)に起因するもの

(OH^+ NO^+ ClO^+ SO^+)

○共存元素(マトリックス)に起因するもの

(MO^+ MOH^+ ArM^+)

硝酸, 硫酸, 塩酸およびりん酸を使用した時に観測される多原子分子イオン

m/z	元素(天然存在比)	H ₂ O(HNO ₃)	H ₂ SO ₄	HCl	H ₃ PO ₄
16	O(99.8)	¹⁶ O			
17	O(0.04)	¹⁶ OH			
18	O(0.20)	¹⁶ OH ₂ , ¹⁸ O			
19	F(100)	¹⁶ OH ₃			
20	Ne(99.2)	¹⁸ OH ₂			
21	Ne(0.26)	¹⁸ OH ₃			
22	Ne(8.82)				
23	Na(100)				
24	Mg(78.8)				
25	Mg(10.15)				
26	Mg(11.05)				
27	Al(100)				
28	Si(92.21)	¹⁴ N ¹⁴ N, ¹² C ¹⁶ O			
29	Si(4.7)	¹⁴ N ¹⁴ NH, ¹² C ¹⁶ OH			
30	Si(3.09)	¹⁴ N ¹⁶ O			
31	P(100)	¹⁴ N ¹⁶ OH			
32	S(95.02)	¹⁶ O ¹⁶ O	³² S		
33	S(0.75)	¹⁶ O ¹⁶ OH	³³ S, ³² SH		
34	S(4.21)	¹⁶ O ¹⁸ O	³⁴ S, ³³ SH		
35	Cl(75.77)	¹⁶ O ¹⁸ OH	³⁴ SH	³⁵ Cl	
36	Ar(0.34), S(0.02)	³⁶ Ar	³⁶ S	³⁵ ClH	
37	Cl(24.23)	³⁶ ArH	³⁶ SH	³⁷ Cl	
38	Ar(0.06)	³⁸ Ar	³⁷ ClH		
39	K(93.08)	³⁸ ArH			
40	Ar(99.6), Ca(96.97), K(0.01)	⁴⁰ Ar			
41	K(6.91)	⁴⁰ ArH			
42	Ca(0.64)	⁴⁰ ArH ₂			
43	Ca(0.14)				
44	Ca(2.06)	¹² C ¹⁶ O ¹⁶ O			
45	Sc(100)	¹² C ¹⁶ O ¹⁶ OH			
46	Ti(7.99), Ca(0.003)	¹⁴ N ¹⁶ O ¹⁶ O	³² S ¹⁴ N		
47	Ti(7.32)		³³ S ¹⁴ N		
48	Ti(73.98), Ca(0.19)		³⁴ S ¹⁴ N, ³² S ¹⁶ O		
49	Ti(5.46)		³³ S ¹⁶ O		
50	Ti(5.25), Cr(4.35), V(0.24)	³⁶ Ar ¹⁴ N	³⁴ S ¹⁶ O	³⁵ Cl ¹⁴ N	³¹ P ¹⁶ O ³¹ P ¹⁶ O ¹ H

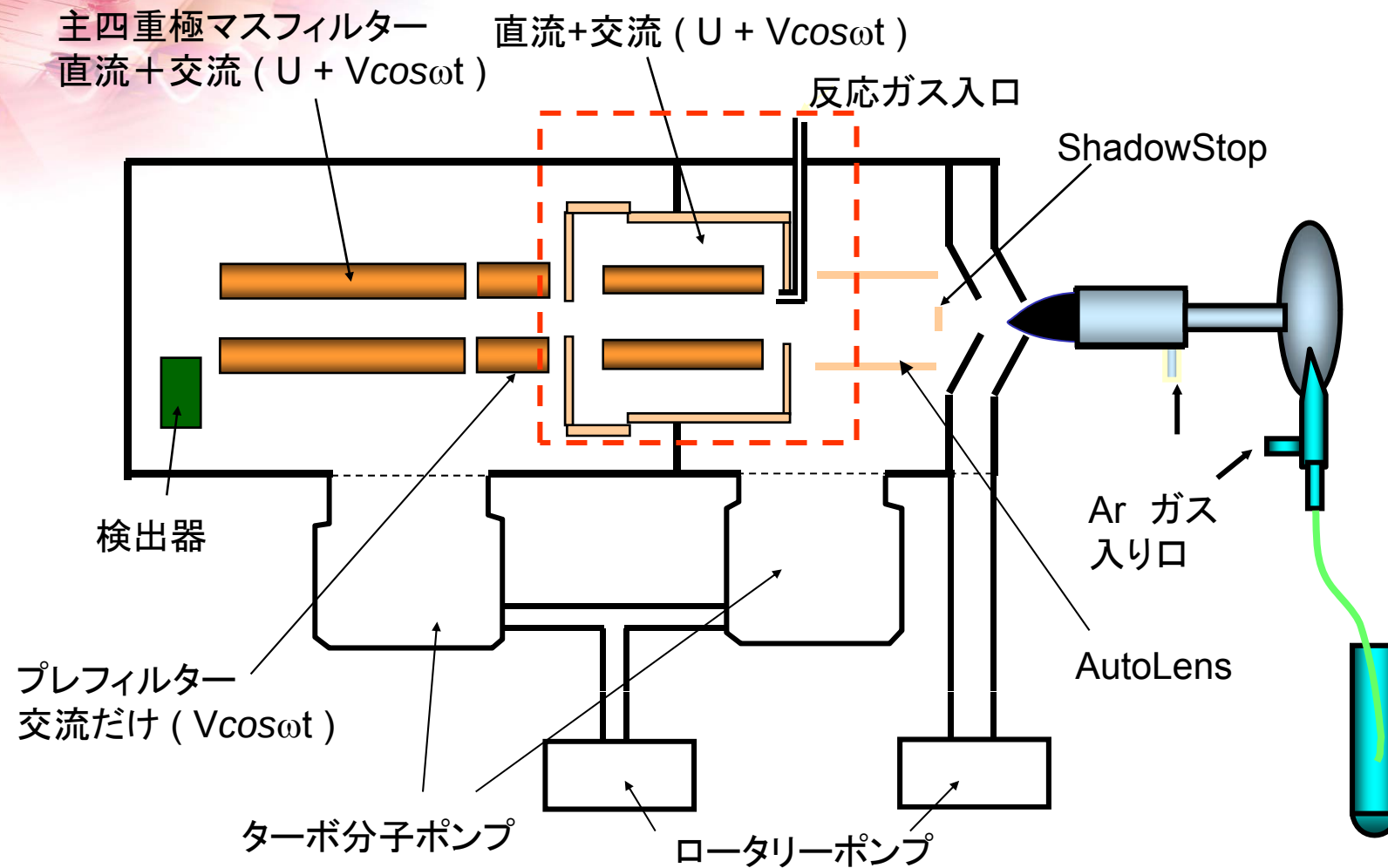
硝酸, 硫酸, 塩酸およびりん酸を使用した時に観測される多原子分子イオン

51	V(99.76)				$^{37}\text{Cl}^{14}\text{N}$, $^{35}\text{Cl}^{16}\text{O}$	
52	Cr(83.76)	$^{40}\text{Ar}^{12}\text{C}$, $^{36}\text{Ar}^{16}\text{O}$	$^{36}\text{S}^{16}\text{O}$		$^{35}\text{Cl}^{16}\text{OH}$	
53	Cr(9.51)				$^{37}\text{Cl}^{16}\text{O}$	
54	Fe(5.82), Cr(2.38)	$^{40}\text{Ar}^{14}\text{N}$			$^{37}\text{Cl}^{16}\text{OH}$	
55	Mn(100)	$^{40}\text{Ar}^{14}\text{NH}$				
56	Fe(91.66)	$^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$				
57	Fe(2.19)	$^{40}\text{Ar}^{16}\text{OH}$				
58	Ni(67.77), Fe(0.33)					
59	Co(100)					
60	Ni(26.16)					
61	Ni(1.25)					
62	Ni(3.66)					
63	Cu(69.1)					$^{31}\text{P}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$
64	Zn(48.89), Ni(1.16)		$^{32}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{32}\text{S}^{32}\text{S}$			
65	Cu(69.1)		$^{33}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{32}\text{S}^{33}\text{S}$			
66	Zn(27.81)		$^{34}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{32}\text{S}^{34}\text{S}$			
67	Zn(4.11)		$^{36}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{32}\text{S}^{36}\text{S}$	$^{35}\text{Cl}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$		
68	Zn(18.57)	$^{40}\text{Ar}^{14}\text{N}^{14}\text{N}$		$^{37}\text{Cl}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$		
69	Ga(60.16)			$^{36}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$		
70	Ge(20.51), Zn(0.62)	$^{40}\text{Ar}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$		$^{36}\text{Ar}^{37}\text{Cl}$		
71	Ga(39.84)		$^{40}\text{Ar}^{32}\text{S}$			
72	Ge(27.4)	$^{36}\text{Ar}^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^{33}\text{S}$			
73	Ge(7.76)		$^{40}\text{Ar}^{34}\text{S}$			
74	Ge(36.56), Se(0.87)	$^{36}\text{Ar}^{38}\text{Ar}$				
75	As(100)		$^{40}\text{Ar}^{36}\text{S}$	$^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$		
76	Ge(7.77), Se(9.02)	$^{36}\text{Ar}^{40}\text{Ar}$		$^{40}\text{Ar}^{37}\text{Cl}$		
77	Se(7.58)	$^{36}\text{Ar}^{40}\text{ArH}$				
78	Se(23.52), Kr(0.35)	$^{38}\text{Ar}^{40}\text{Ar}$				
79	Br(50.54)	$^{38}\text{Ar}^{40}\text{ArH}$				
80	Se(49.82), Kr(2.27)	$^{40}\text{Ar}^{40}\text{Ar}$	$^{32}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$			
81	Br(49.46)	$^{40}\text{Ar}^{40}\text{ArH}$	$^{32}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}$			$^{38}\text{Ar}^{31}\text{P}$
82	Kr(11.56), Se(9.19)	$^{40}\text{Ar}^{40}\text{ArH}_2$	$^{34}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$			
83	Kr(11.55)		$^{34}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{OH}$			$^{40}\text{Ar}^{31}\text{P}$
84	Kr(56.9), Sr(0.56)		$^{36}\text{S}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$			



スペクトル干渉の除去法

- 共存元素を除去する
- 高分解能ICPMSを利用する
- 試料導入法の利用(酸化物軽減)
- 低温プラズマ法or混合ガス法
- コリジョン・リアクションセル(CRC)法

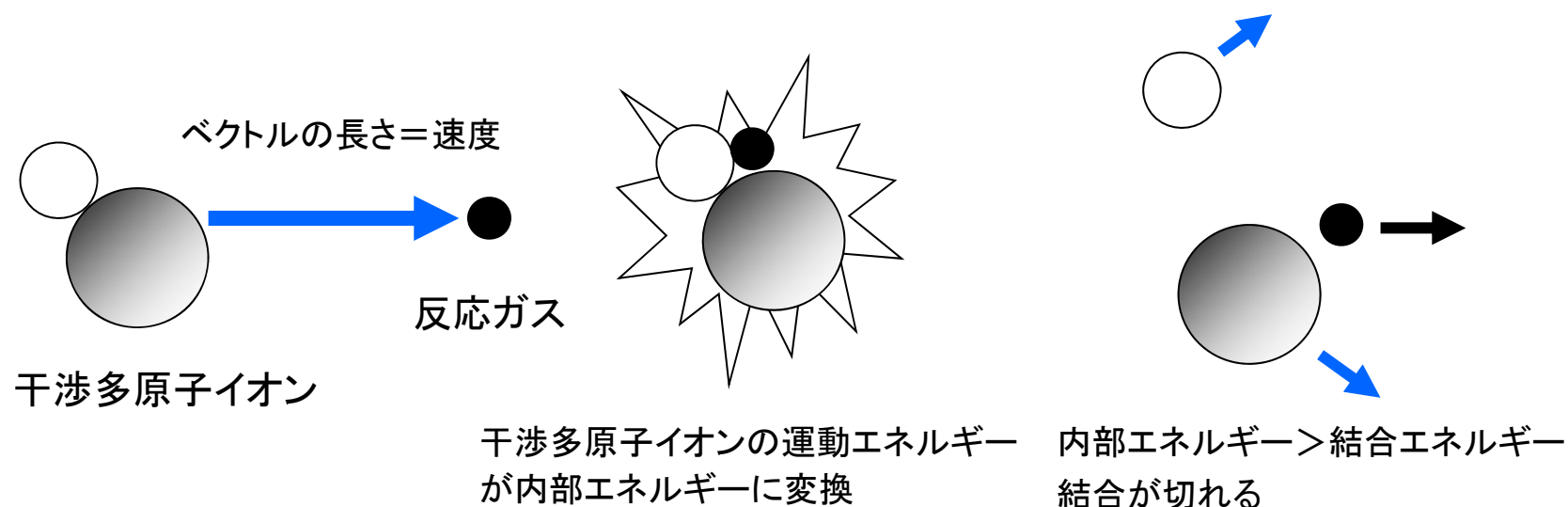


四重極セルを搭載したICPMS

メカニズム<その1> (コリジョン)

多原子イオンを反応ガスと衝突させて解離させる

衝突誘起解離 (Collision Induced Dissociation : CID)

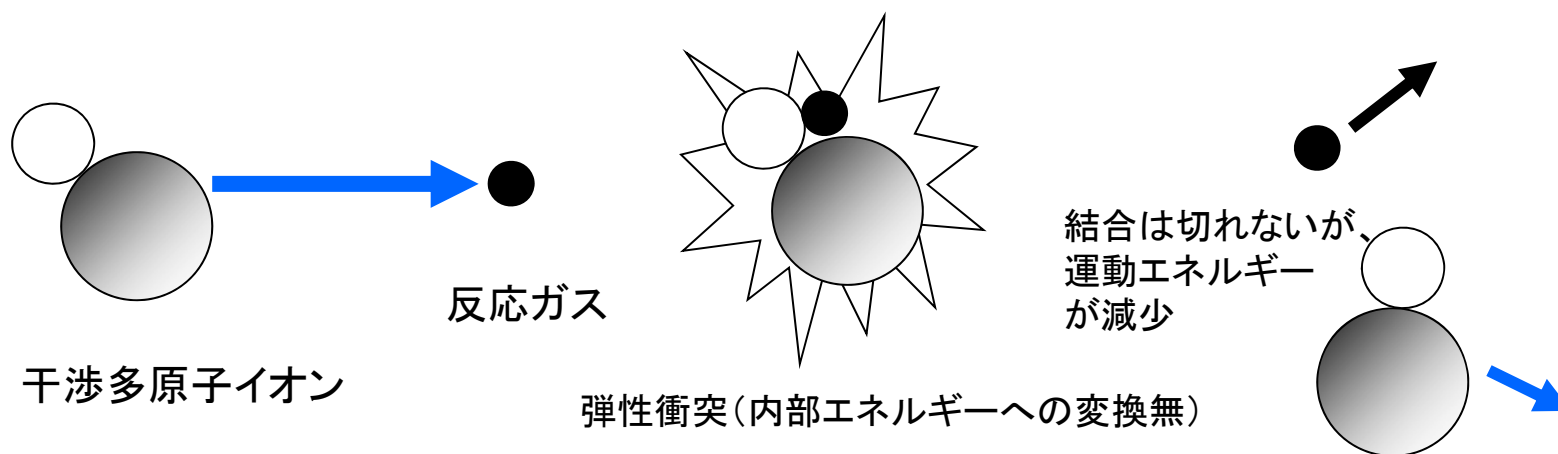


結合エネルギーの小さい ArX^+ や MAr^+ ($D_0 < 1 \text{ eV}$)
が干渉を引き起こすケースがほとんど

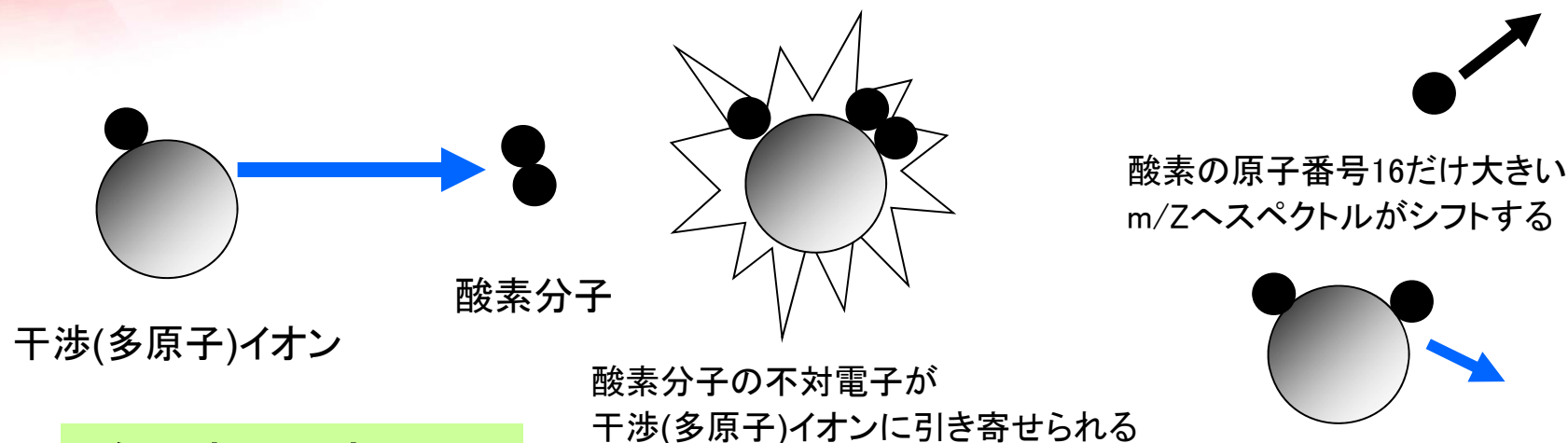
メカニズム<その2> (コリジョン)

多原子イオンを反応ガスと衝突させて脱エネルギー化し、エネルギー障壁によって通過を不可能にする

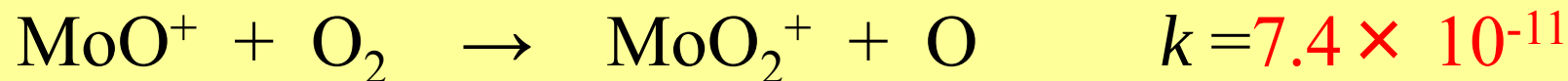
脱エネルギー化 (Kinetic Energy Discrimination : KED)



メカニズム<その3> (リアクション)



酸化物生成反応



H																				He
Li	Be													B	C	N	O	F		Ne
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl		Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br				Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I				Xe
Cs	Ba	LA	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At				Rn
Fr	Ra	AC																		
Lanthanoid			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinoid			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			
						>10			1~10			0.1~1			< 0.1					

リアクション