

# 全てのイオンを加速するデジタル加速器

高山 健

加速器研究施設

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

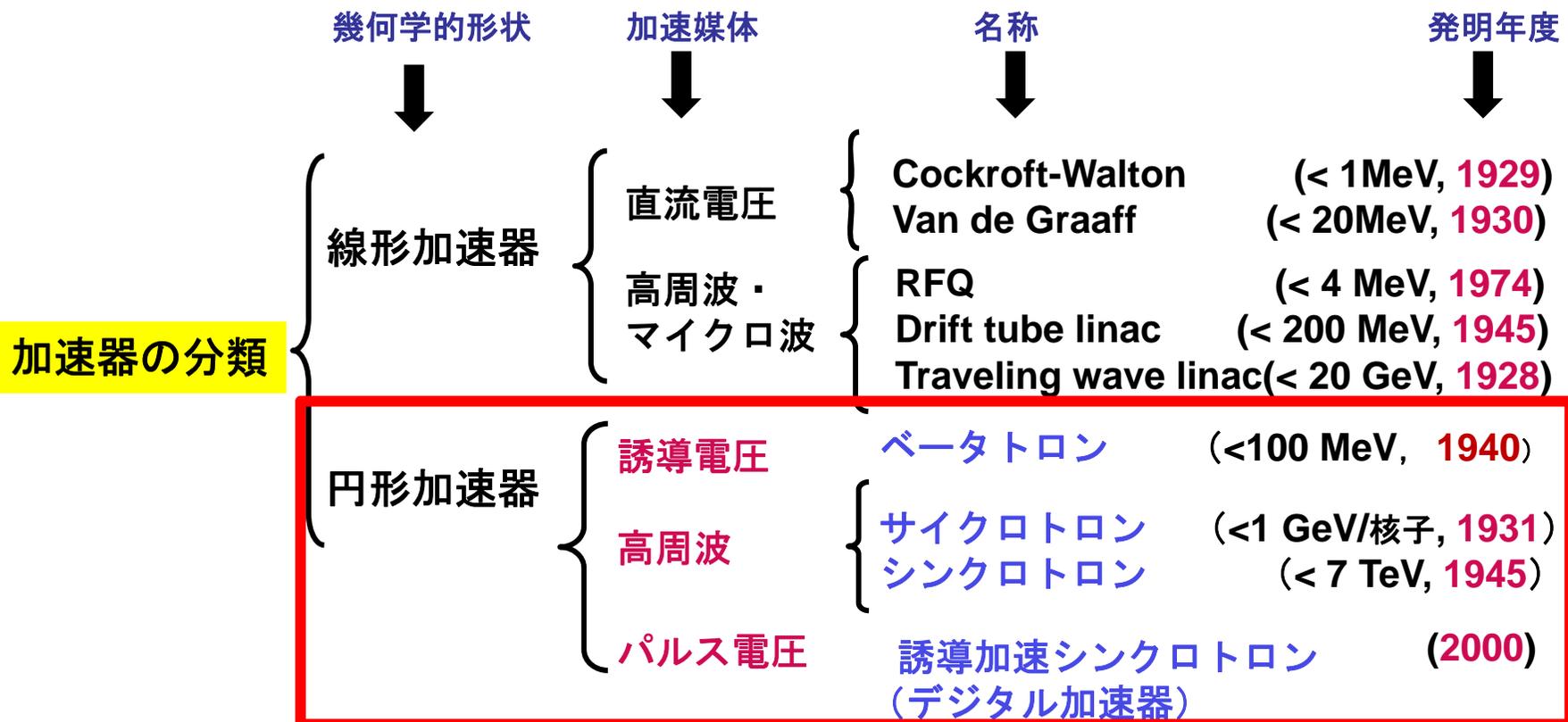
平成21年度KEK公開講座

2009年10月17日（土曜）、筑波大学春日キャンパス

順番	内容	時間
1	円形加速器の進化	25 m
	休憩	2 m (27 m)
2	誘導加速シンクロトロンの原理と実証試験	10 m (37 m)
3	実用加速器としてのデジタル加速器へ	10 m (47 m)
	休憩	2 m (49 m)
4	デジタル加速器の応用	20 m (69 m)
5	まとめ・時間調整	4 m (73 m)
6	休憩・質疑応答	17 m (90 m)

# 加速器の分類

加速器とは：電子、陽子、イオン等の粒子を加速する道具  
 これらの粒子は物質構成する原子、原子核と直接的に反応  
 を起こすので概ね全ての科学を切り開く先鋭的実験装置となる



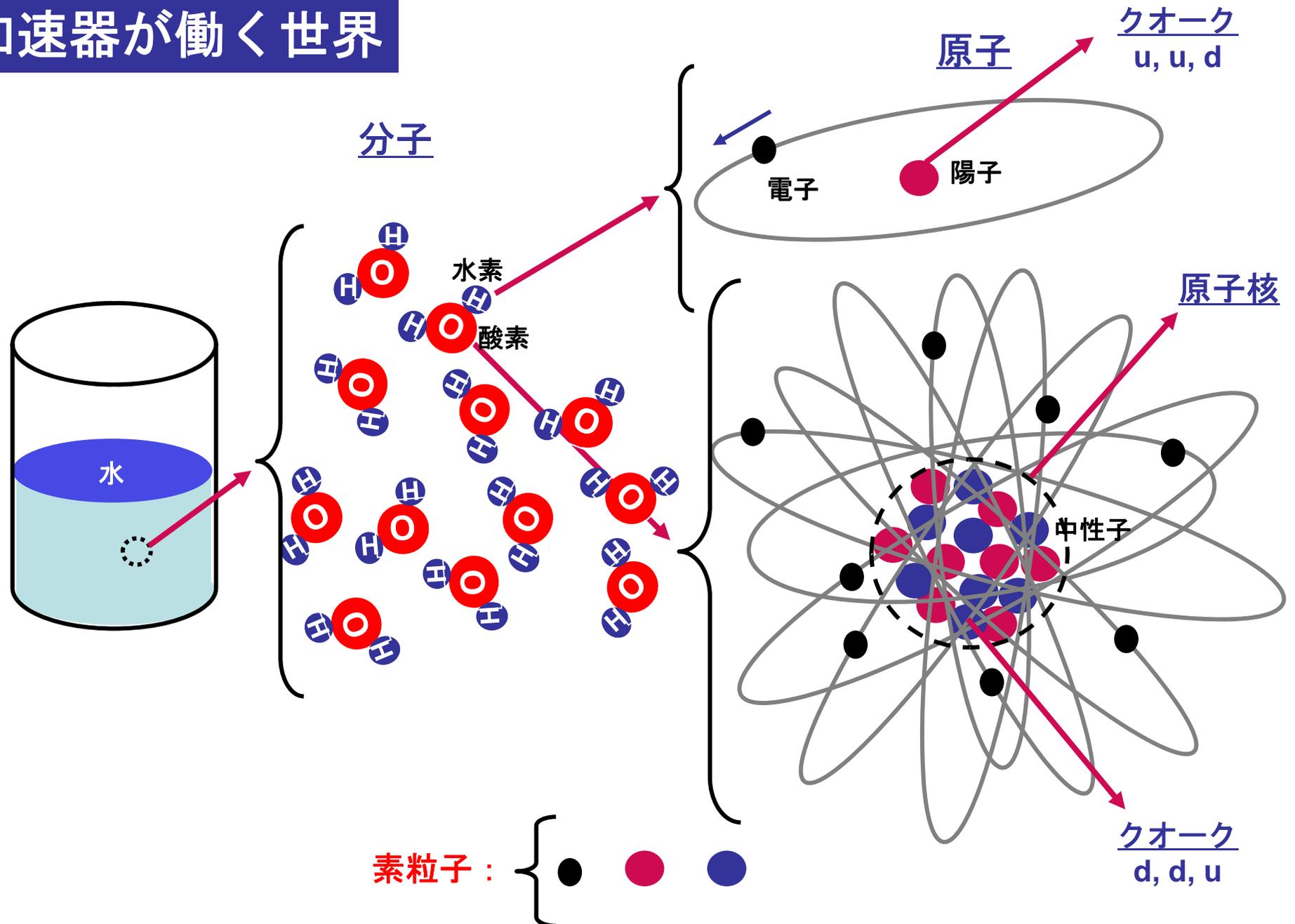
加速器の分類

↑  
本日の講演

1. 円形加速器の進化の跡
2. 共通する要素
3. 新型加速器（デジタル加速器）の特徴

# 水、分子、原子、原子核、素粒子、クォーク

## 加速器が働く世界



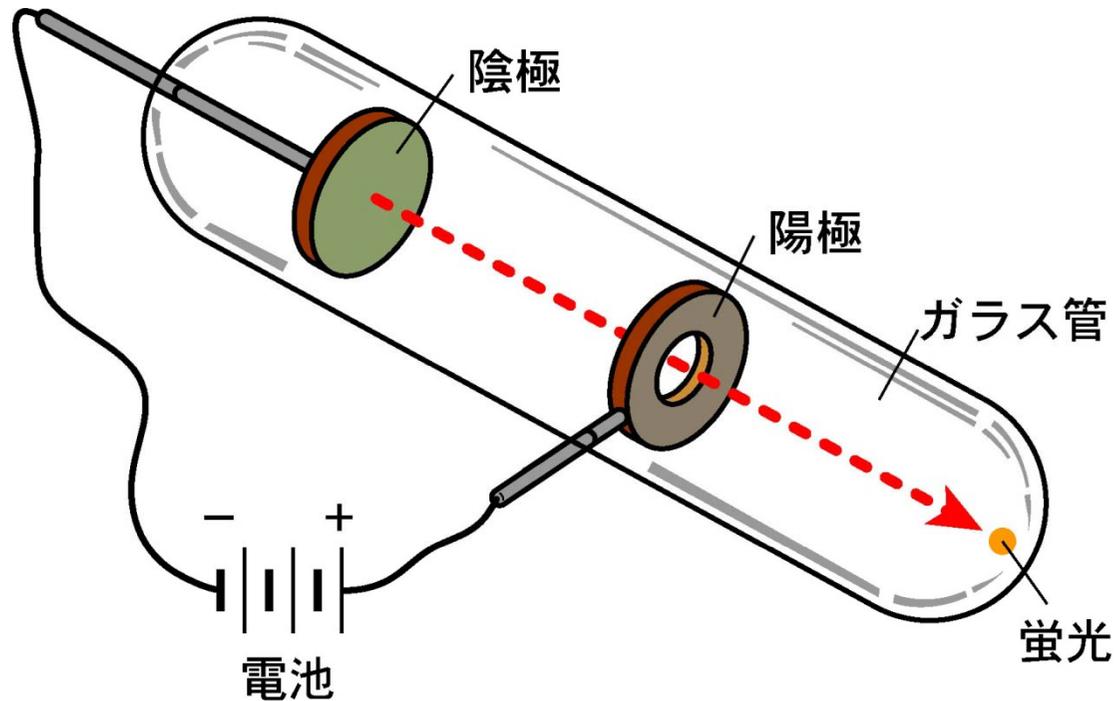
# 陰極管：史上初の粒子加速器

→ 人工的に物質外へ素粒子を取り出す

1854 プリュッカー（独） 蛍光の観察

1895 ペラン（仏） 負の電荷がガラス管を叩いている事を証明

1895 レントゲン（独） 陽極の穴をふさいでも、蛍光を観測。X線の発見（1901 Nobel P.）



(プリュッカーの実験装置)

# 身近にある粒子加速器

一般家庭にもある

ブラウン管テレビ



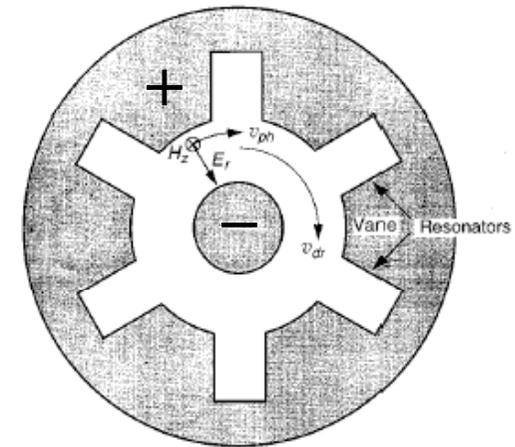
電子銃

電子レンジ



マグネトロン

加速器/減速器



医療用 X 線



二極管

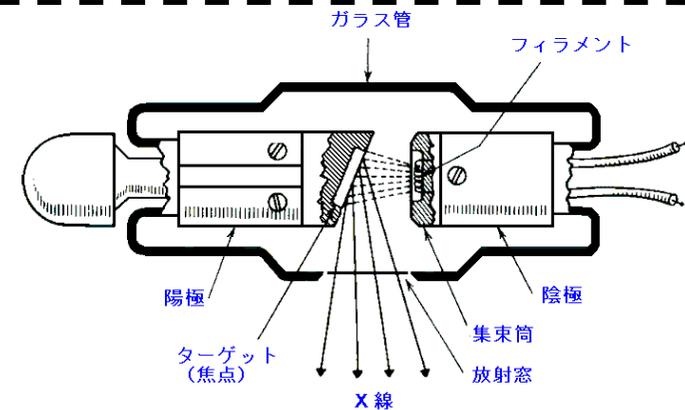


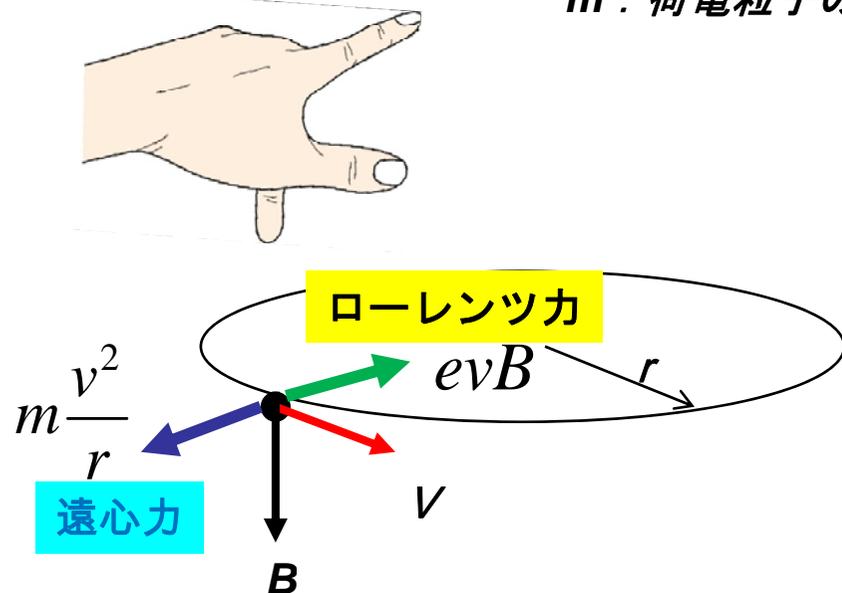
図1 エックス線管の構造

# 円形加速器を知る基礎 (1)

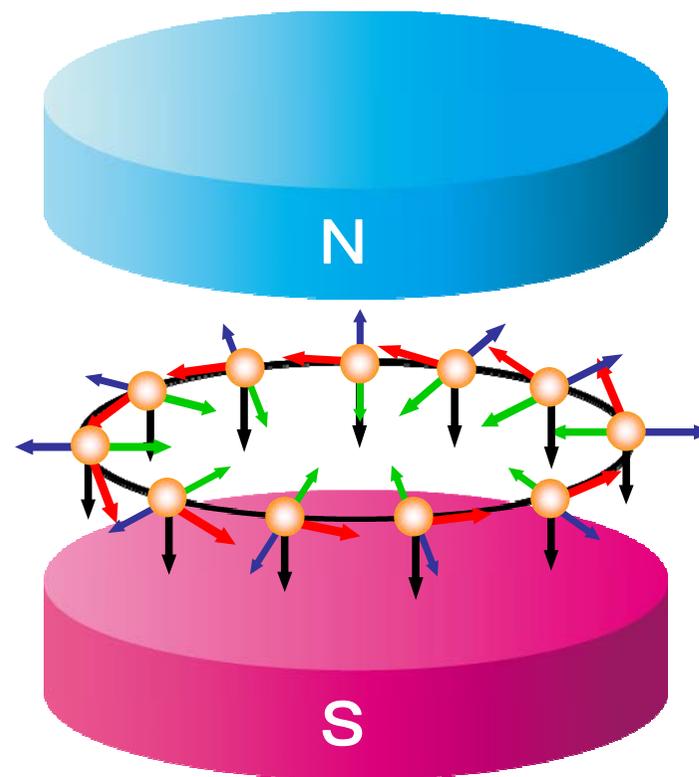
## 磁場の中での荷電粒子の運動

フレミング左手の法則

$e$  : 荷電粒子の電荷  
 $m$  : 荷電粒子の質量

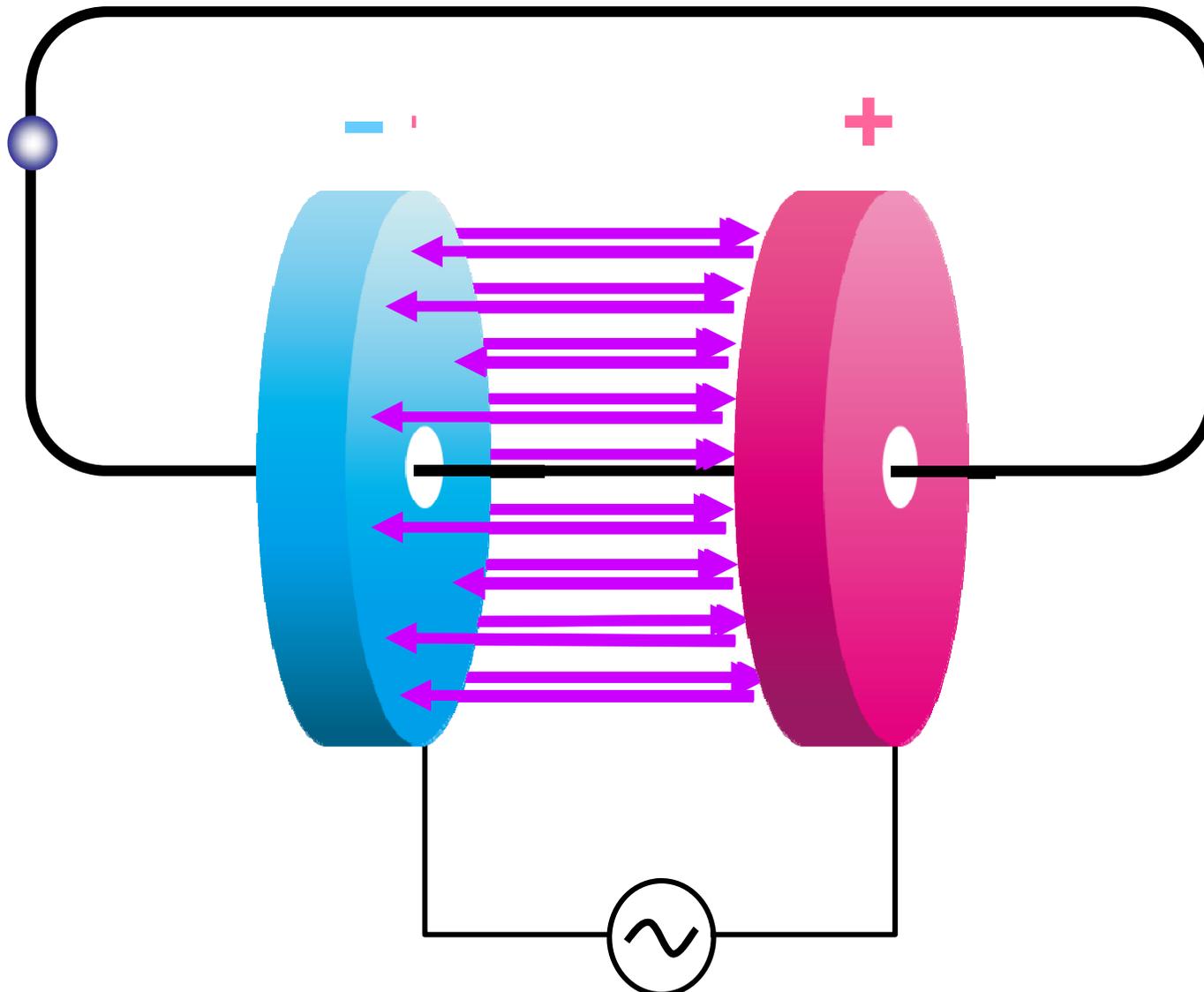


	磁場
	遠心力
	ローレンツ力
	速度

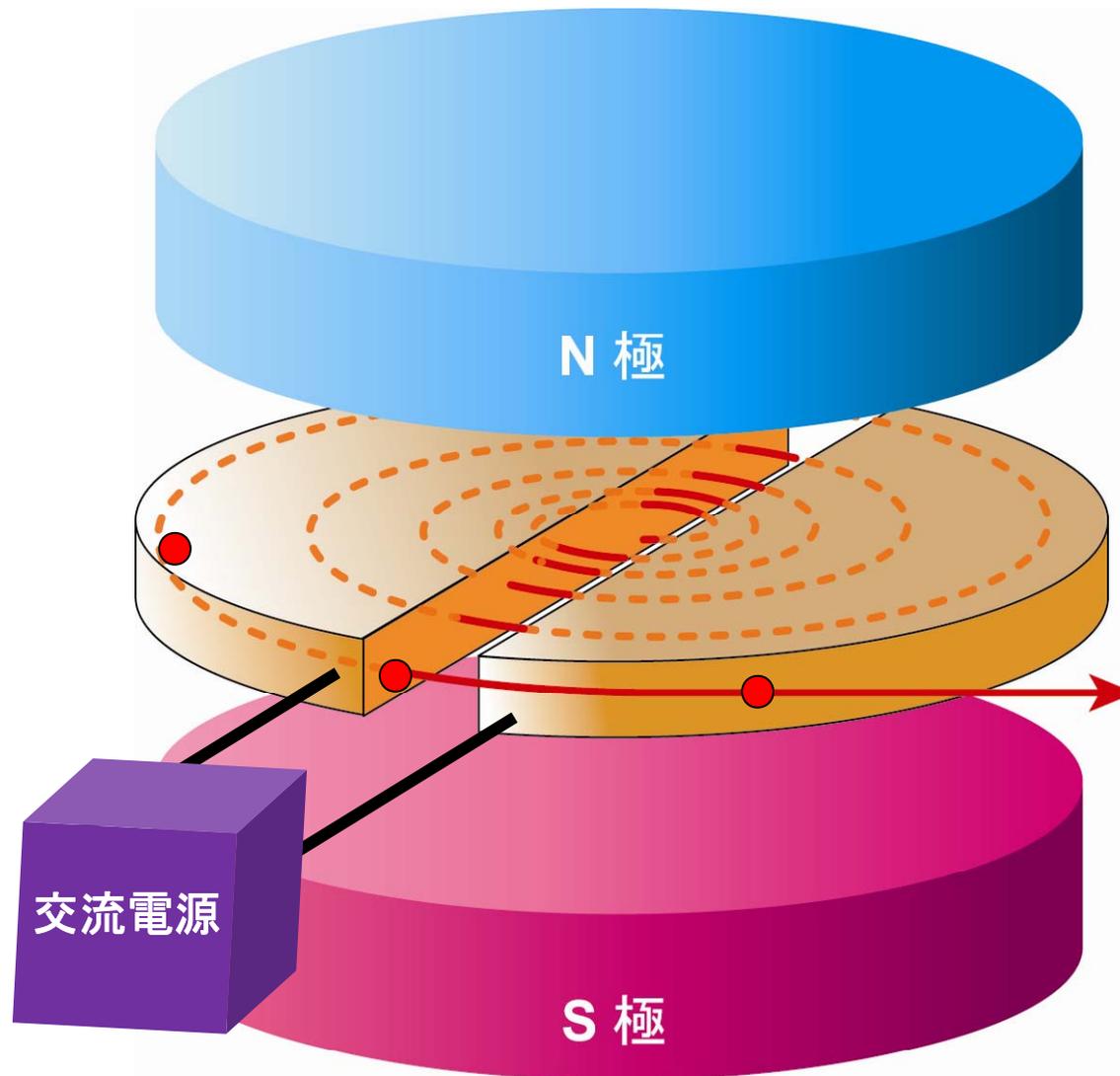


# 円形加速器を知る基礎 (2)

## 交流 (高周波) 電場での加速

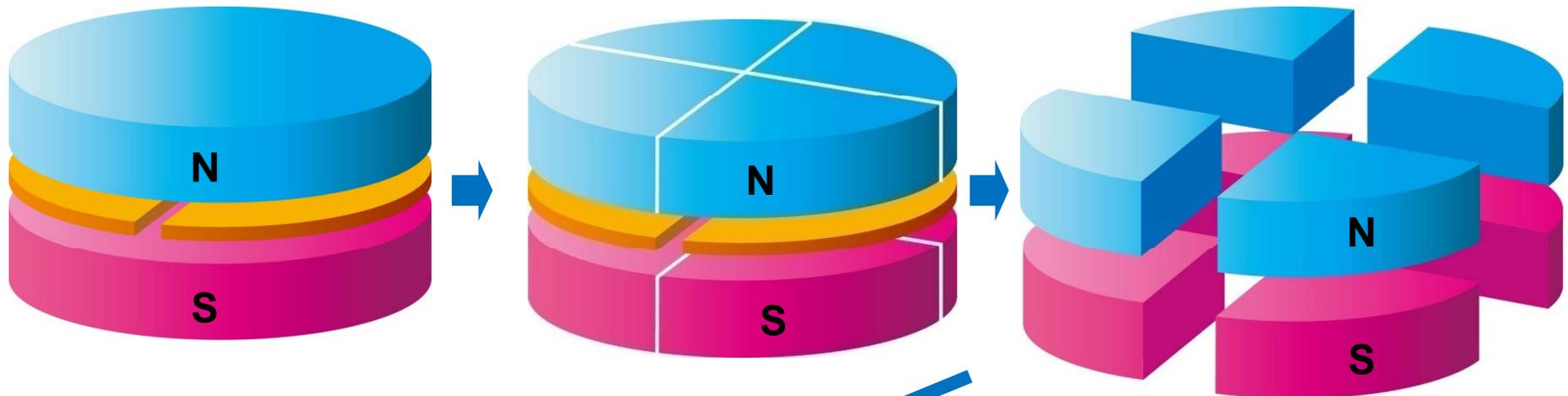


# サイクロトロンアニメーション



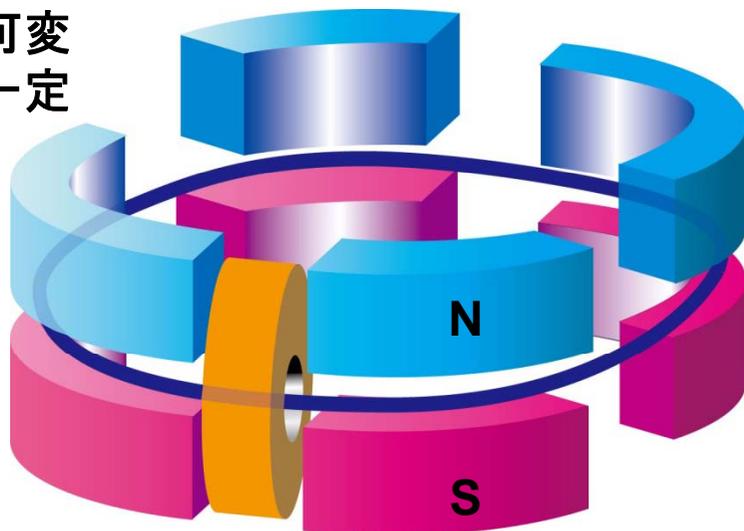
# 円形加速器の進化

磁極の分割



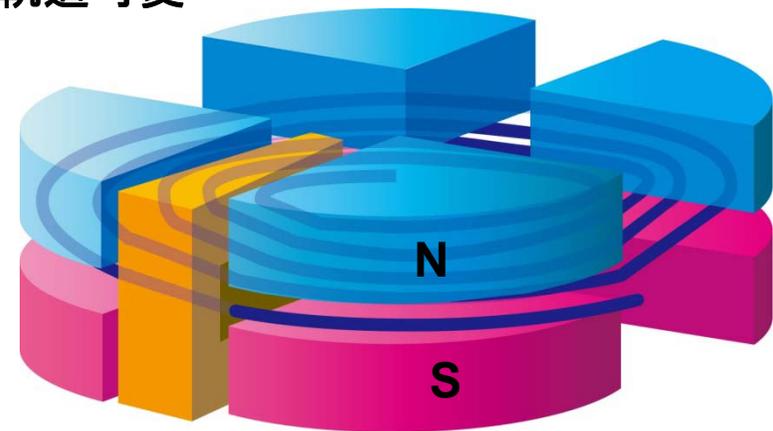
シンクロトロン

磁場可変  
軌道一定



磁場一定  
軌道可変

リングサイクロトロン



# 実際に製作され稼働したサイクロトロン

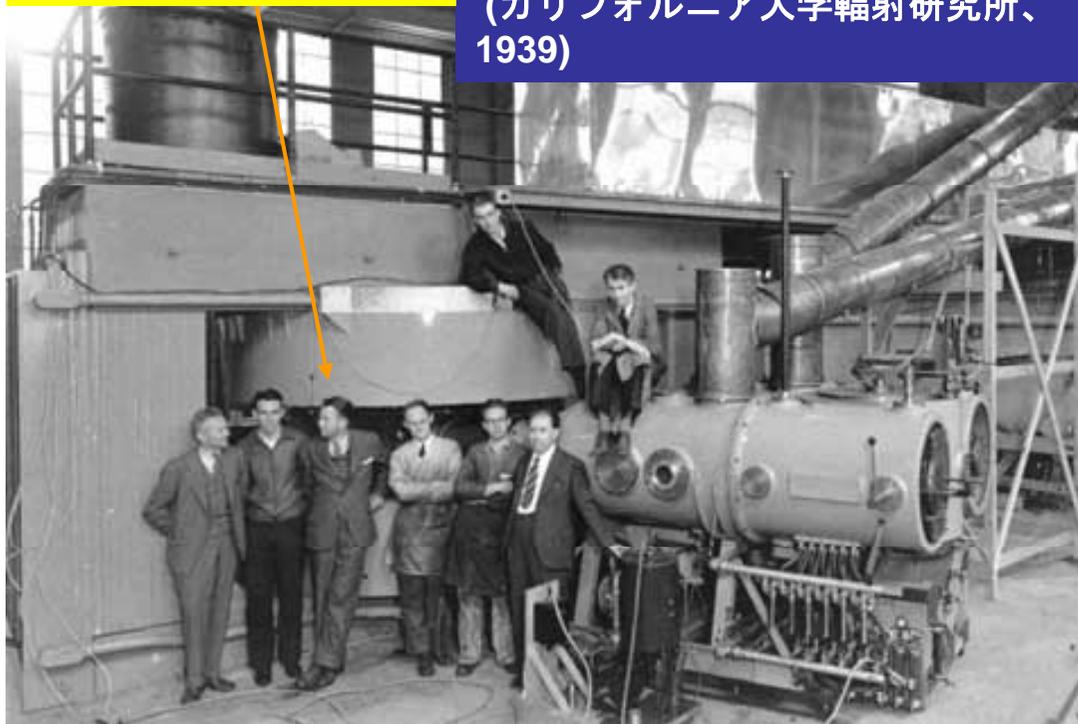
4.5 inch卓上サイクロトロン  
(1931)  
水素イオン  
到達エネルギー：80keV,  
加速電圧：1.8kV

## サイクロトロン1号機

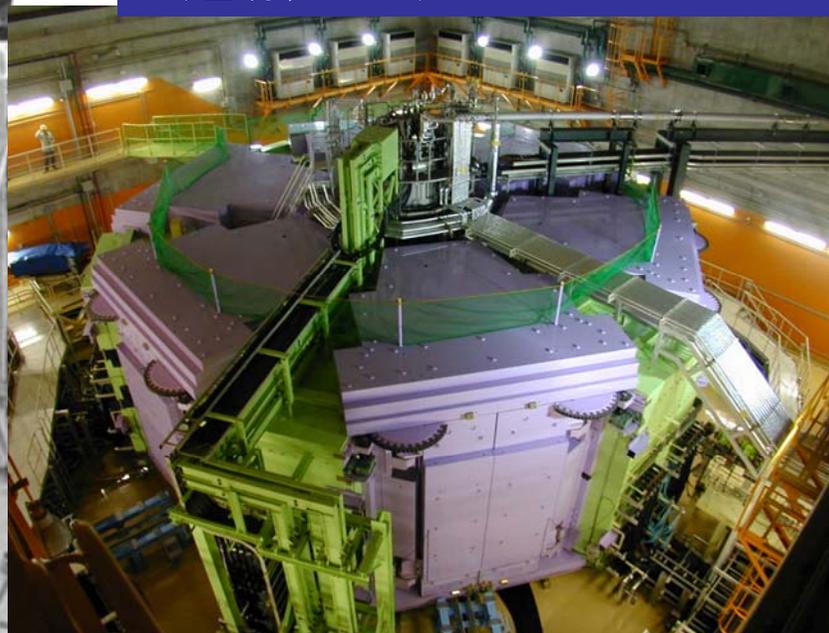


## 発明者E.Lawrence

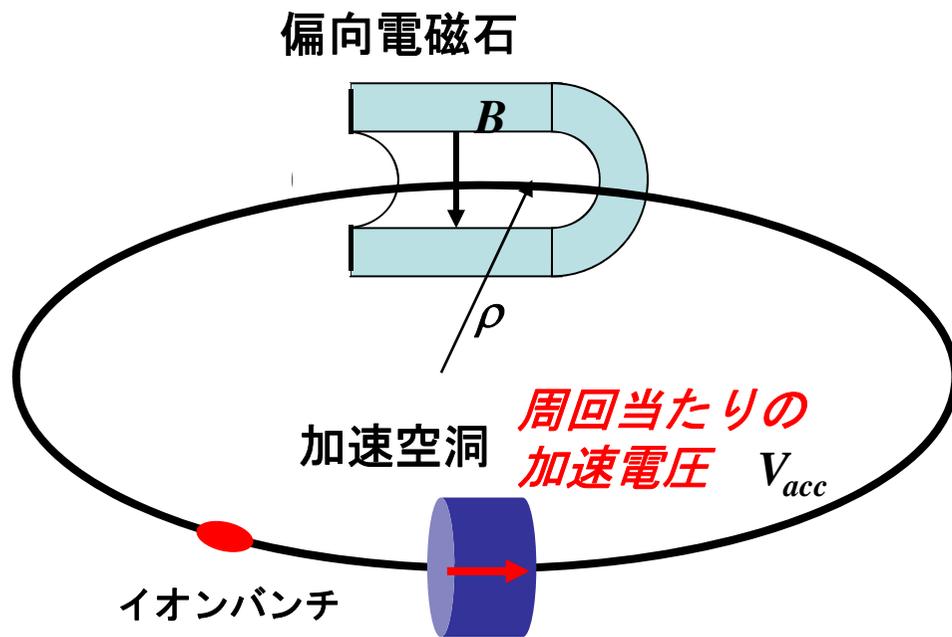
60 inchサイクロトロン (3号機)  
(カリフォルニア大学輻射研究所、  
1939)



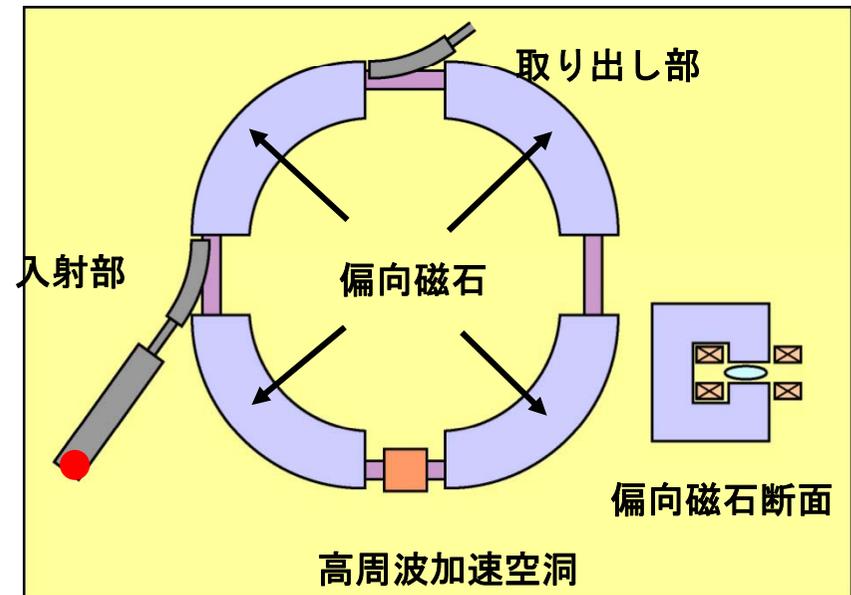
最新のサイクロトロン  
Super-conducting Ring Cyclotron  
(理研、2006)



# シンクロトロン (1) : 閉じた軌道と入射・取り出し



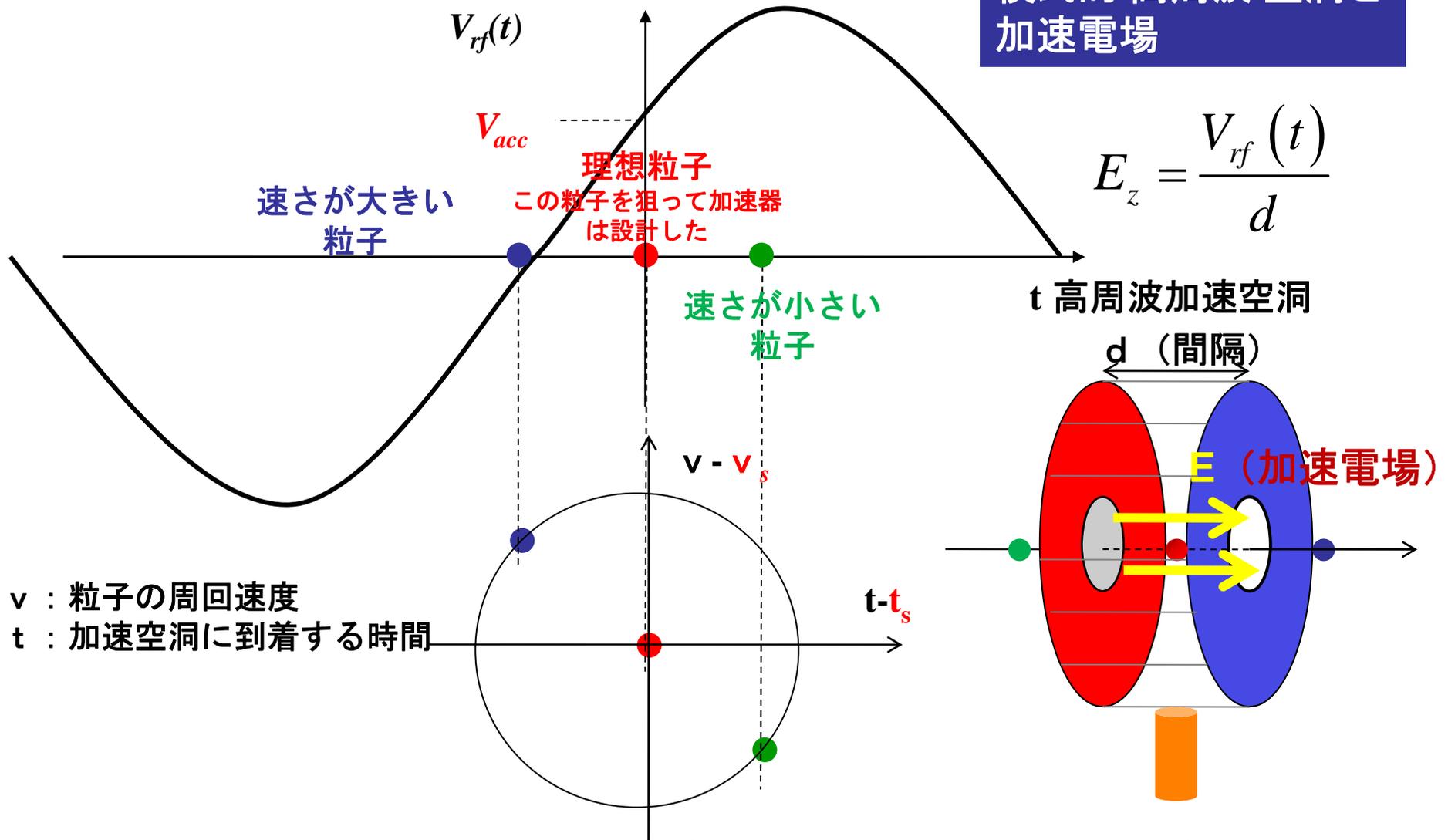
## シンクロトロンの基本構成 (真上から見た図)



# シンクロトロン（２）：加速と閉じ込め（位相安定性）

高周波 電場と加速位相に乗る荷電粒子

模式的 高周波 空洞と  
加速電場



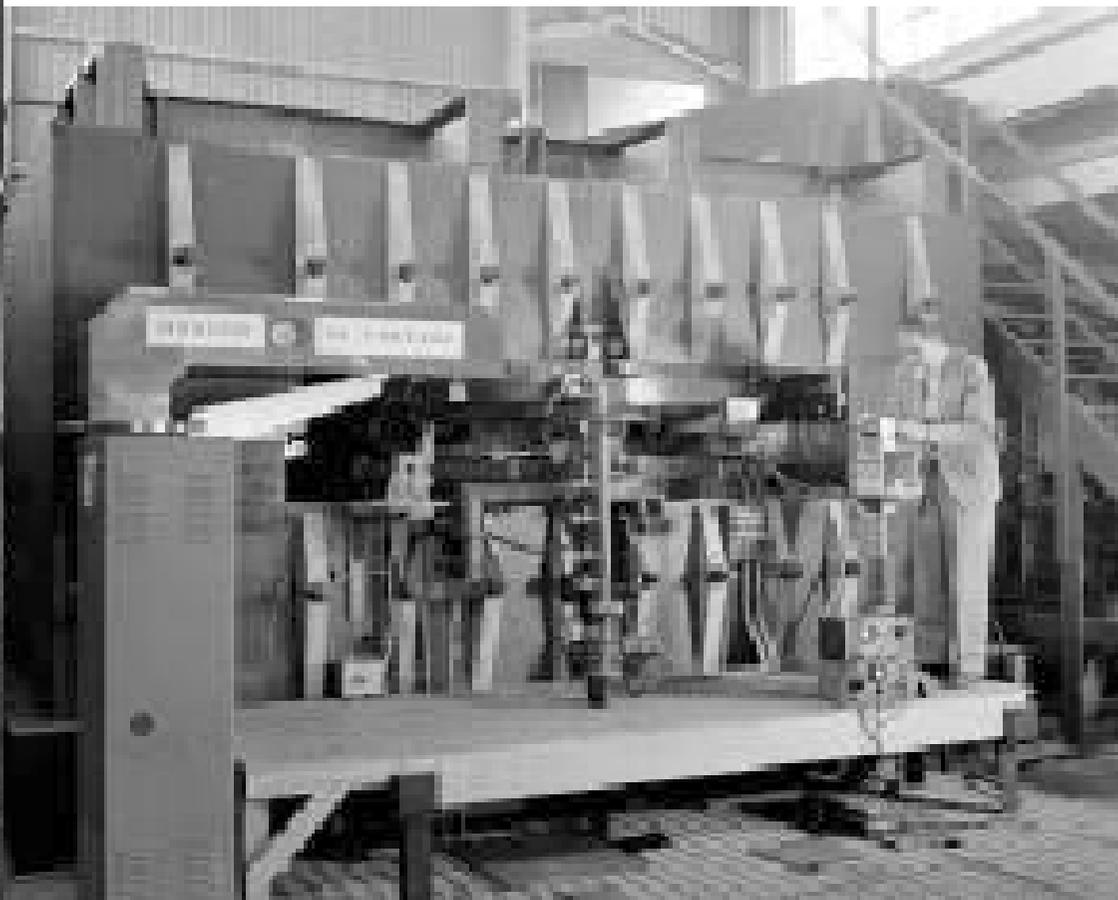
位相安定性

粒子集団（バンチ）の中心（赤い粒子）を狙って加速すれば周りの粒子 $10^{12} \sim 10^{13}$ 個（1-10兆個）が一緒に引きずられて加速される

# 世界初のシンクロトロン

発明者 **E.M.McMillan**

E=340MeV (電子)  
弱収束シンクロトロン、1946年

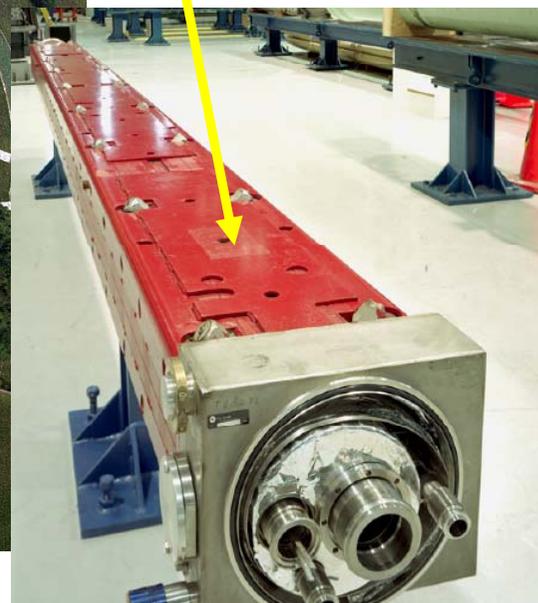
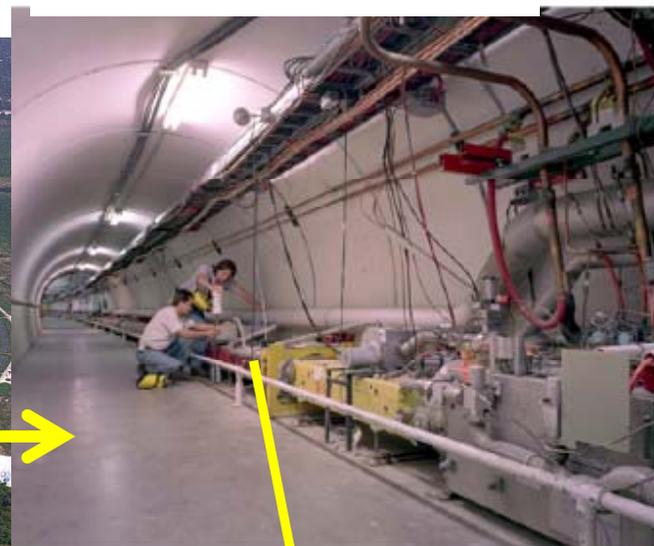


カリフォルニア大学放射研究所 (後のLBL)

# 稼働中の最大のシンクロトロン（米フェルミ研究所）

シカゴの50 kmに西郊外

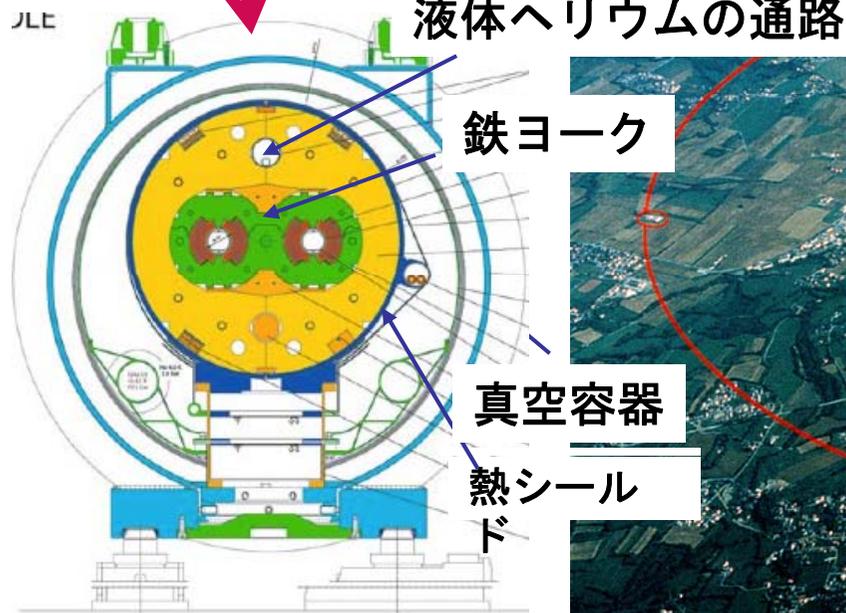
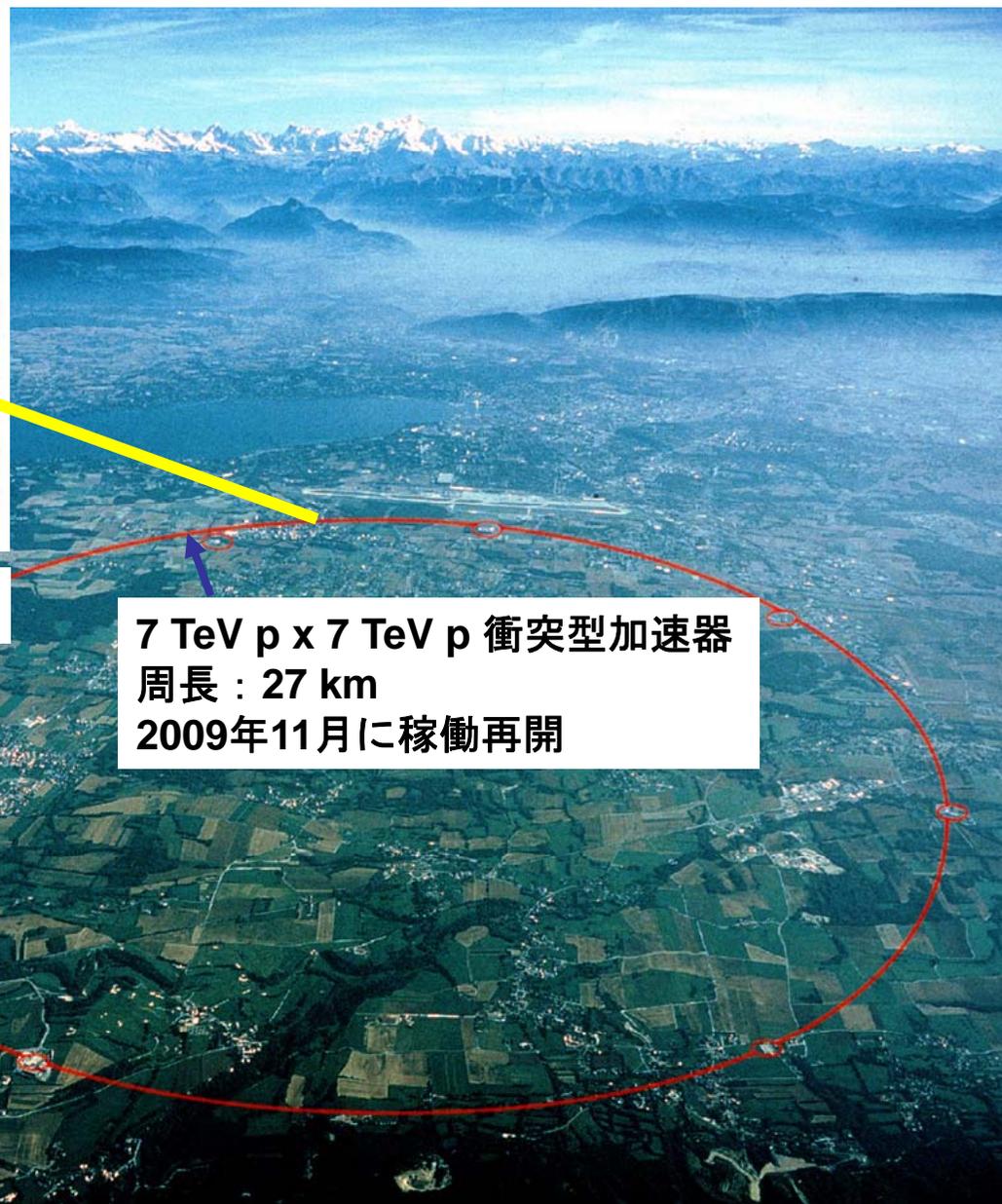
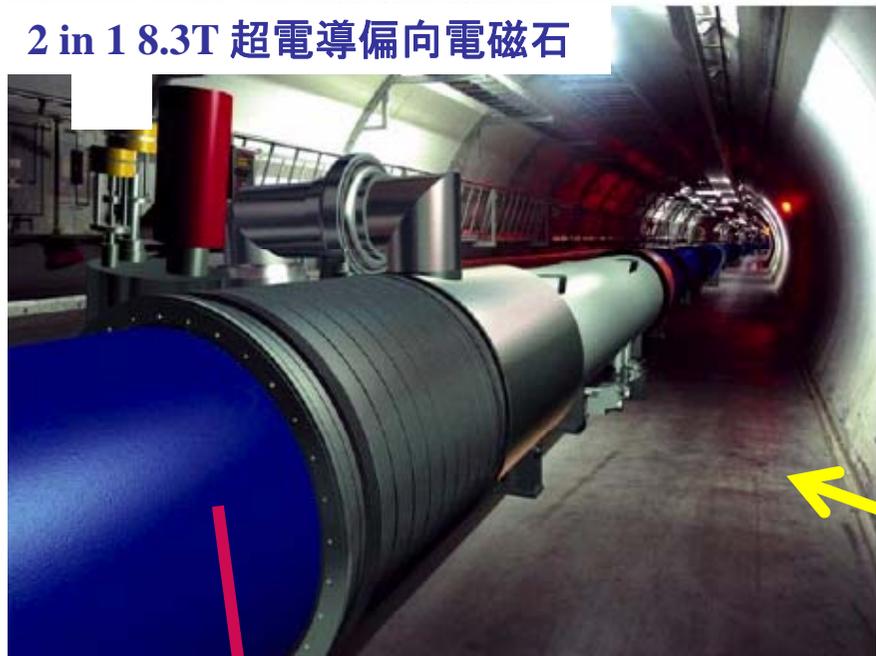
Tevatronトンネル



# 最新のシンクロトロン (ヨーロッパ原子核研究所)

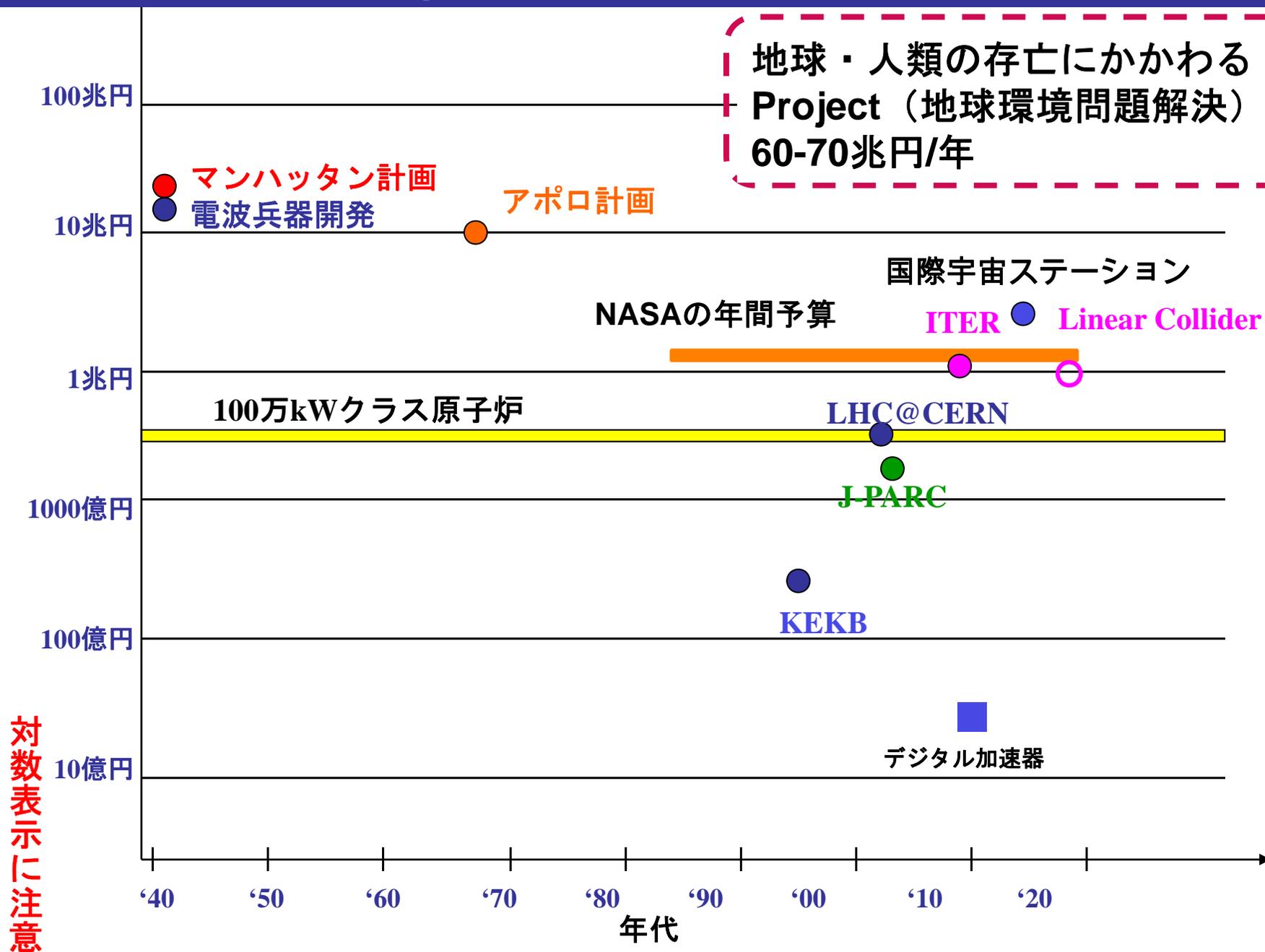
2 in 1 8.3T 超電導偏向電磁石

Large Hadron Collider (LHC)



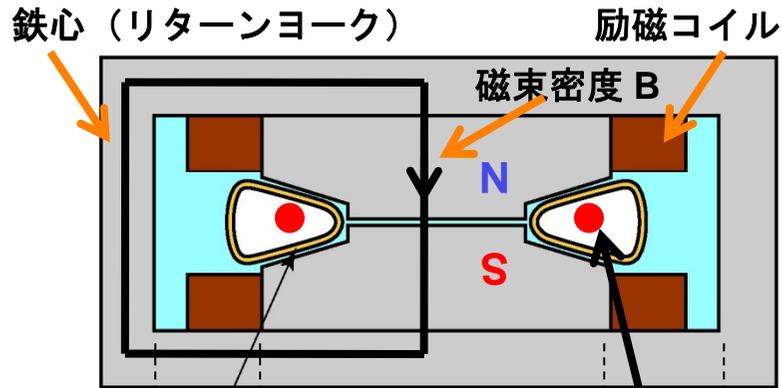
7 TeV p x 7 TeV p 衝突型加速器  
周長: 27 km  
2009年11月に稼働再開

# 近代のBig Science & 国家事業の比較



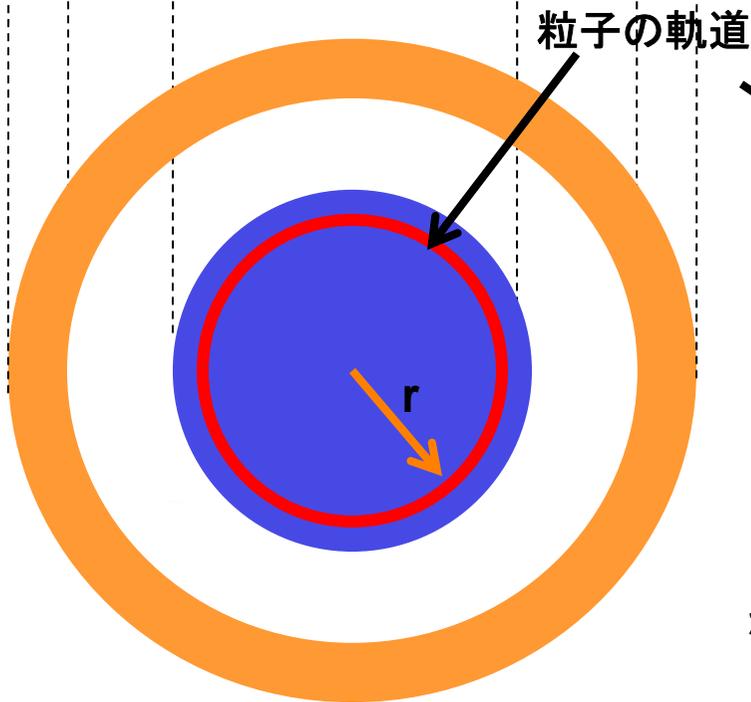
# ベータートロンと誘導加速の原理

側面図



真空箱の断面

平面図



半径  $r$  の軌道に囲まれる領域の  
磁束密度  $B$  時間的に増大させる

磁束  $\Psi$  も一緒に増大

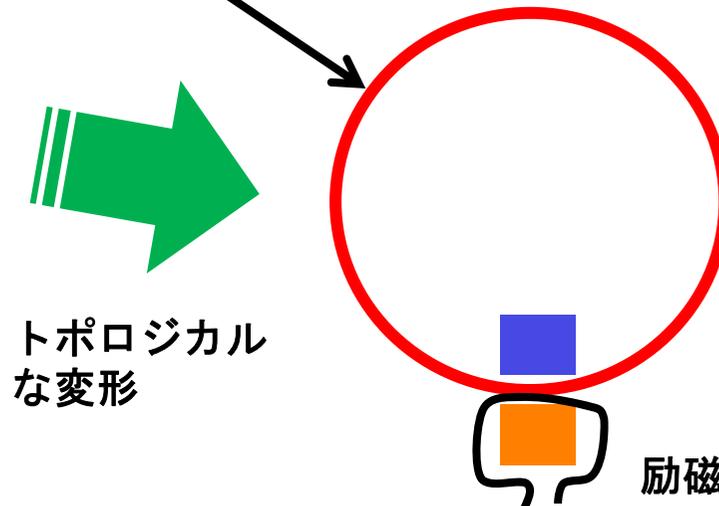
Faradayの誘導法則

軌道に沿って電場が発生

この電場で加速

一周当たりの加速電圧は

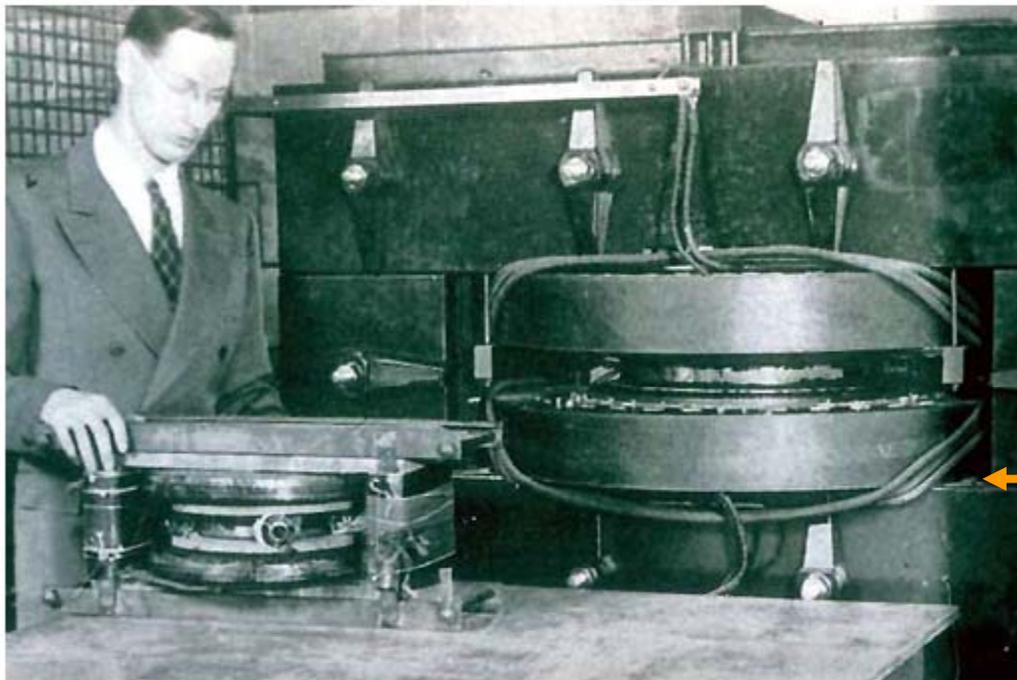
$$V = \oint E \cdot dl = -\frac{d\Psi}{dt} \quad \left( \Psi \equiv \int B \cdot ds \right)$$



# ベータートロンの発明

発明者 Kerst と最初の  
ベータートロン

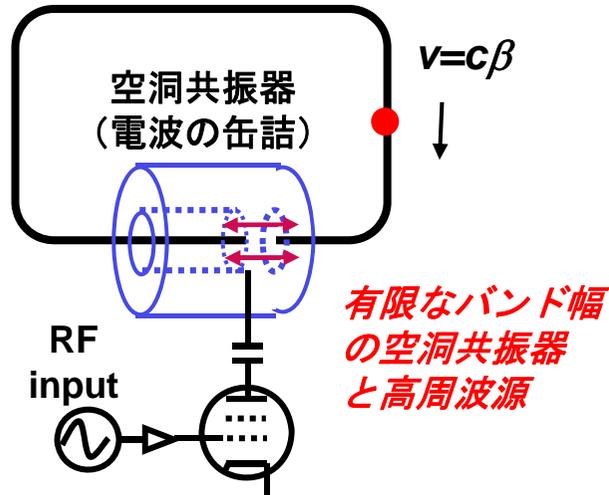
1940年 イリノイ州立大学  
Super-X-Ray Machine or  
Cosmic ray machine



Allis-Charlmers Comp.製  
25MeV ベータートロン  
用途：x-ray lithography

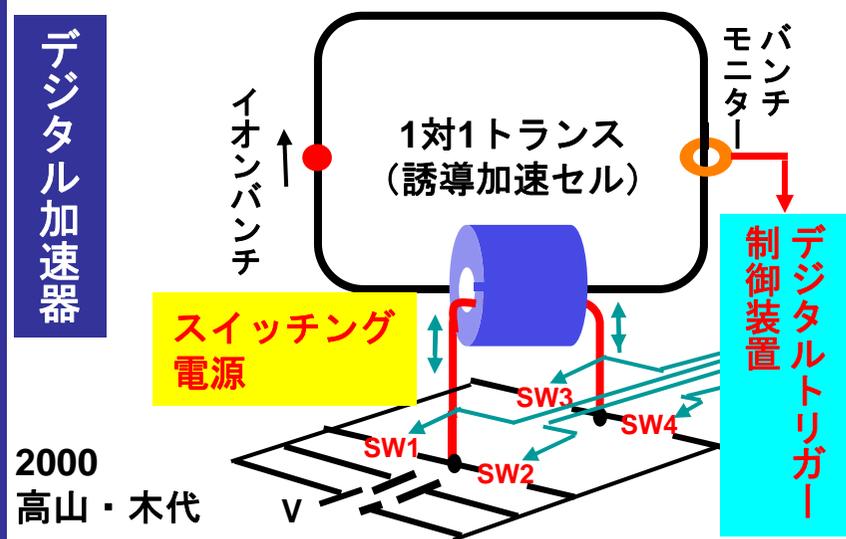
# 誘導加速シンクロトロン（デジタル加速器）の特徴

従来型シンクロトロン

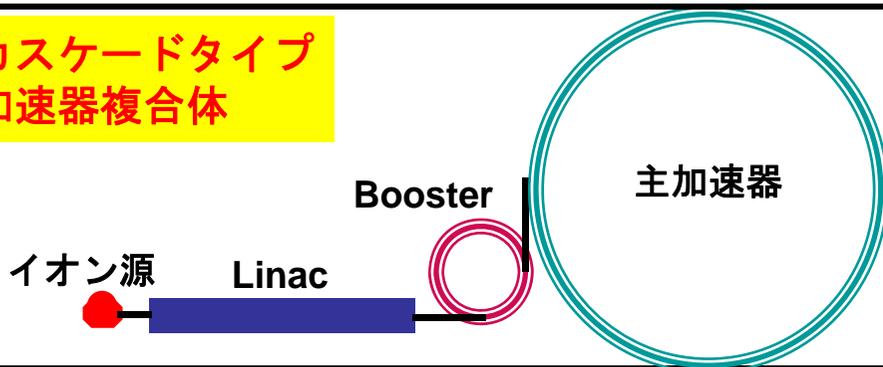


1945 E.M.McMillan, V.Veksler

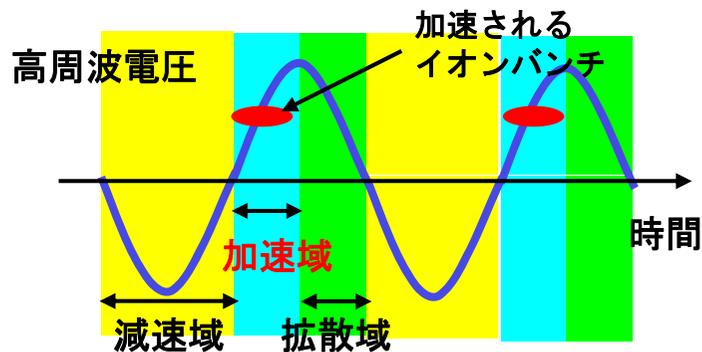
デジタル加速器



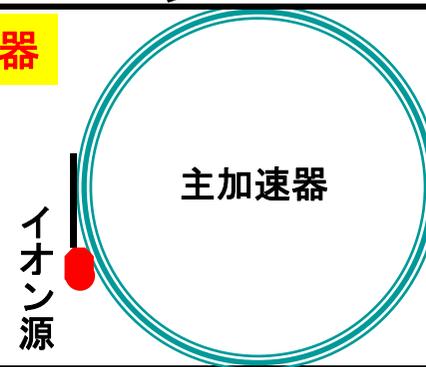
カスケードタイプ  
加速器複合体



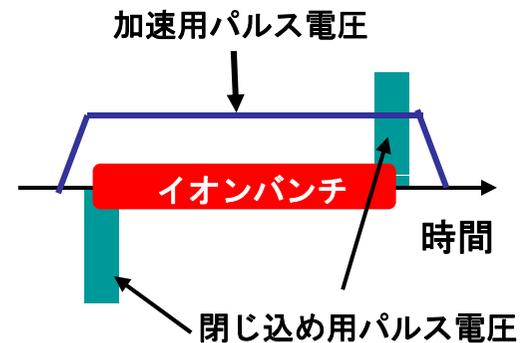
加速と粒子閉じ込めの結合 → 局所ビーム電流の増大  
→ ビーム電流の制限



単純構成加速器

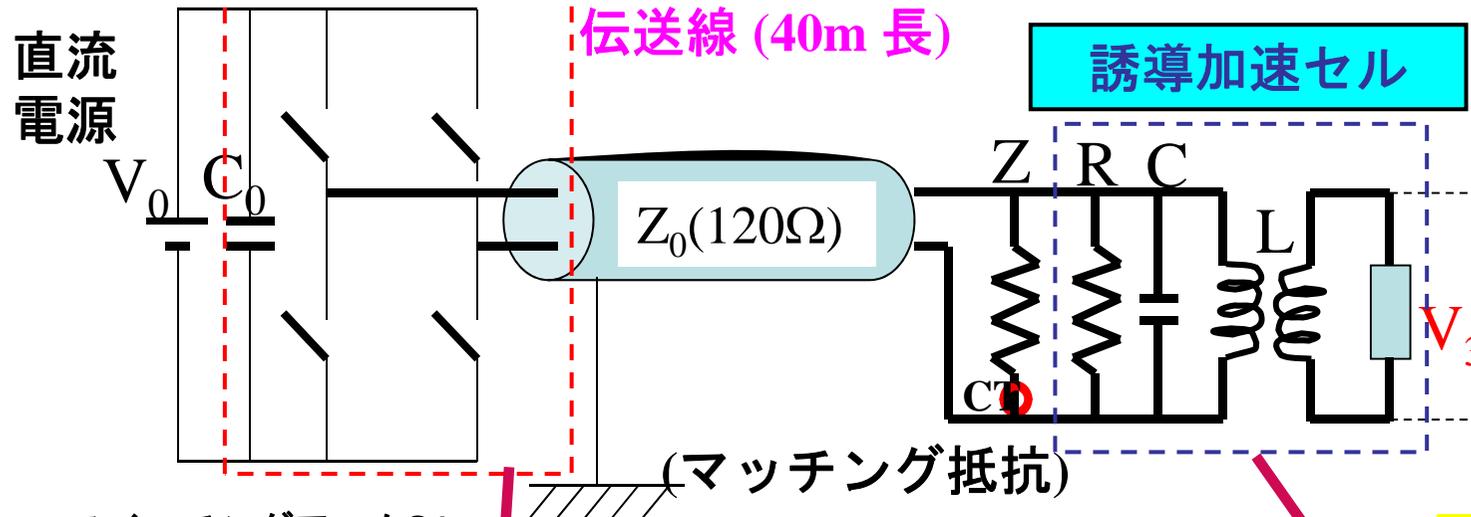


加速と閉じ込めの分離  
→ ビームハンドリングの自由度を大幅にアップ

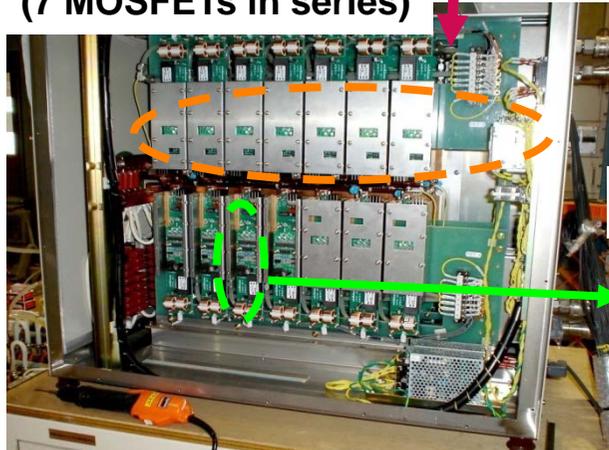


# 誘導加速システムの等価回路と個々の装置

## スイッチング電源



スイッチングアームS1  
(7 MOSFETs in series)



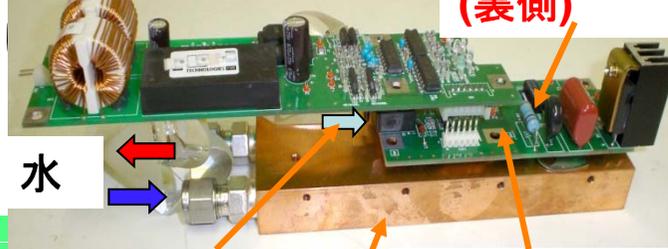
2.5kV, 20A, 1MHz,  
500nsec

KEK・ニチコン共同開発

## MOSFET 基板

ゲート駆動電力

MOSFET  
(裏側)



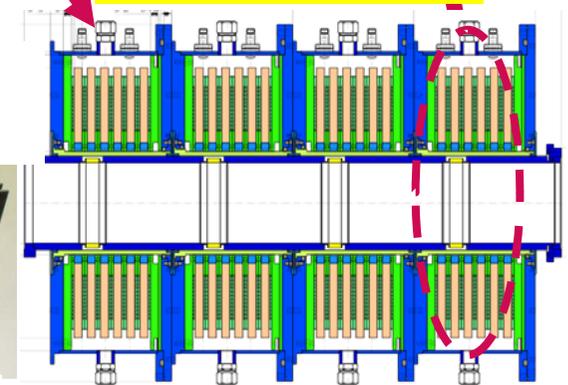
水

ゲートトリ  
ガー信号(光)

ゲート駆動  
集積回路  
(裏側)

熱吸収体

ファインメット  
微細結晶合金  
(日立金属)



4 連加速セル  
(出力 : 2 kV/セル)

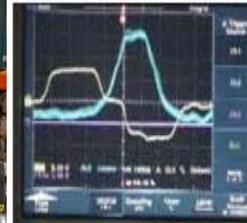
# 誘導加速シンクロトロンの概念の実証 (2006, 3月)

イオン：水素（陽子）  
500 MeV → 6 GeV  
 $N=2.5 \times 10^{11}$

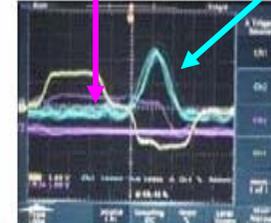


スイッチング電源  
(40kW、Max  $f_{rep}=1\text{MHz}$ )

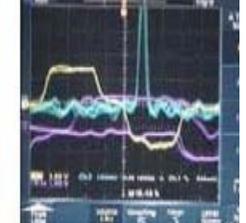
閉じ込め用  
パルス電圧



加速用  
パルス電圧

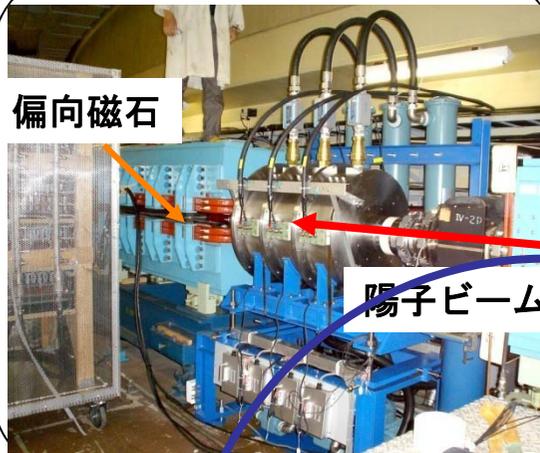


加速途上の  
陽子バンチ信号



500 MeV

6 GeV



偏向磁石

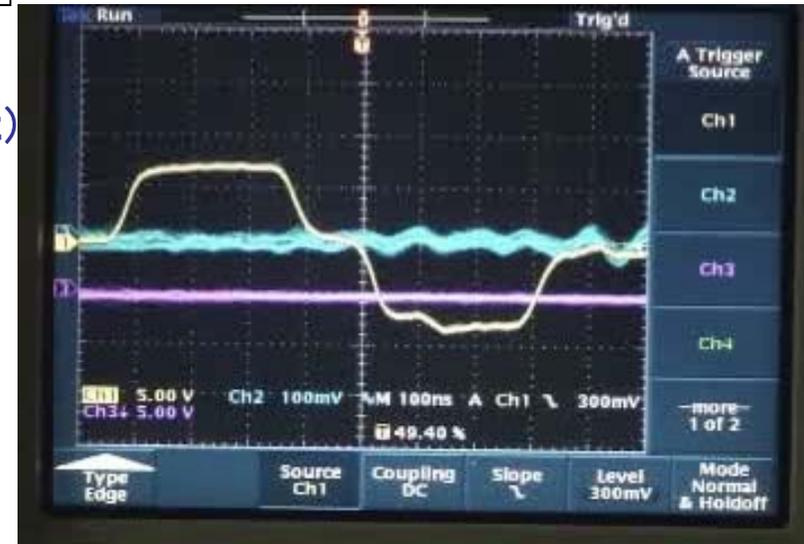
陽子ビーム

誘導加速セル 10セル  
 $V_{out}=2\text{kV/セル}$

KEK 12GeV  
陽子シンクロトロン  
 $C_0=340\text{m}$

500MeV  
ブースターシンクロトロン  
 $C_0=37\text{m}$

40MeV H-線形加速器 750keV  
コックロフト  
ウォルトン

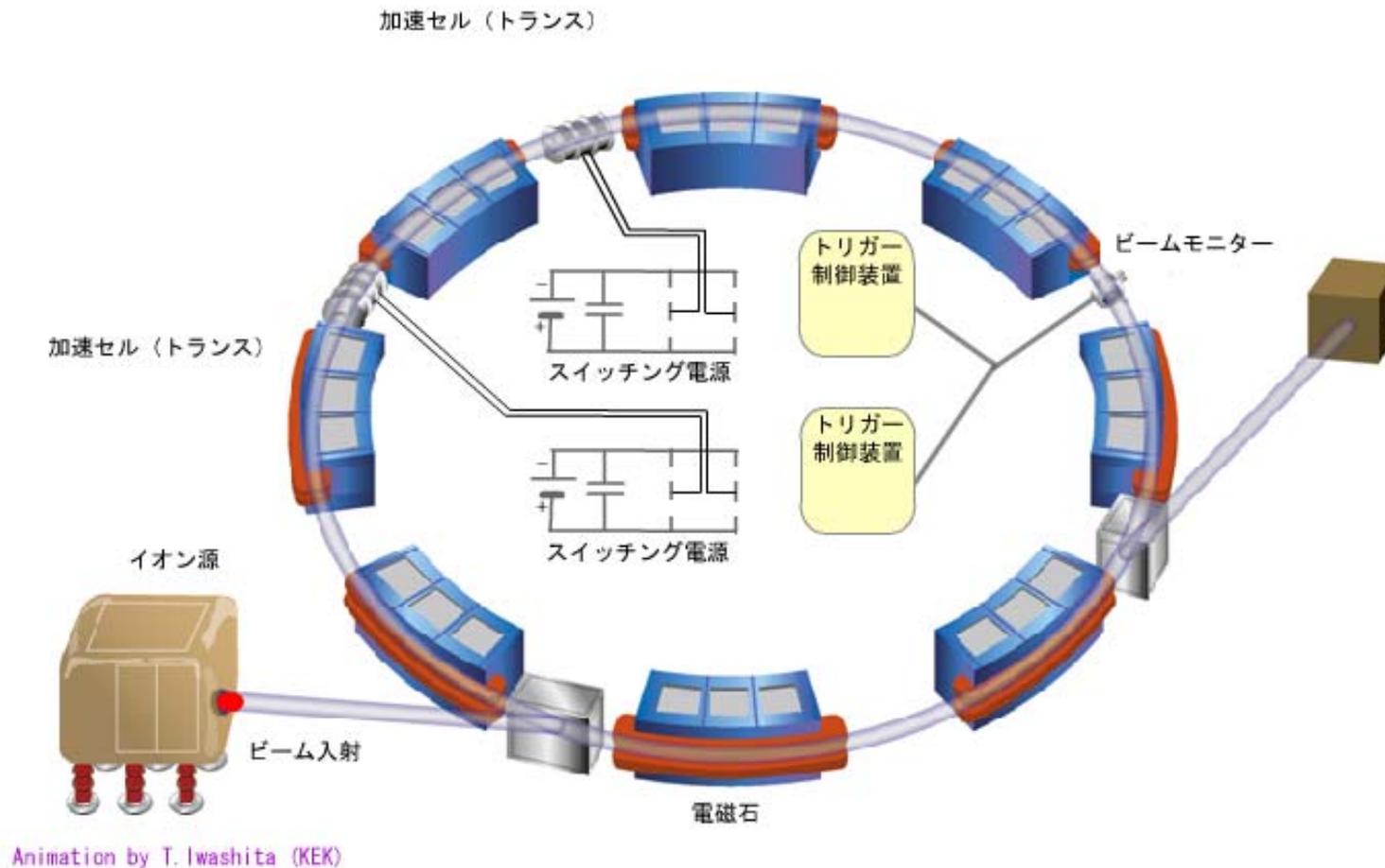


# 誘導加速シンクロトロン（デジタル加速器）のアニメーション

K.Takayama et al., *J. Appl. Phys.*101, 063304 (2007)

発明協会表彰 H20年度21世紀発明賞

アニメーション製作：岩下大器  
(KEK)



# 内外からの反応

CERN Courier News 2005 April

ACCELERATORS

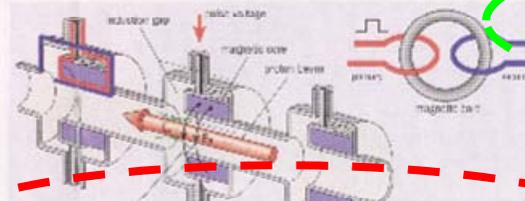
ACCELERATORS

## Rewriting the rules on proton acceleration

For half a century, the synchrotron has been the workhorse of high energy particle physics, from its first use with external beams to the modern particle colliders. The basic principle is to use the electric field in a radio-frequency (RF) wave to accelerate charged particles, the frequency varying to keep in time with particles on a constant trajectory through a ring of guiding magnets.

Now a team has demonstrated a different way of accelerating the protons in tests at the proton synchrotron (PS) at KEK, the Japanese High Energy Accelerator Research Organization in Tsukuba. For the first time, a bunch of protons in the synchrotron has been accelerated by an induction method (K Takayama et al, 2004). The technique may overcome certain effects that normally limit the intensity achieved in a synchrotron beam, and could open up the way to

Ken Takayama describes recent tests at KEK that have demonstrated induction acceleration in a proton synchrotron.



日刊工業新聞

2006年(平成18年)5月26日 金

誘導加速  
高工

誘導加速  
高工

日本経済新聞

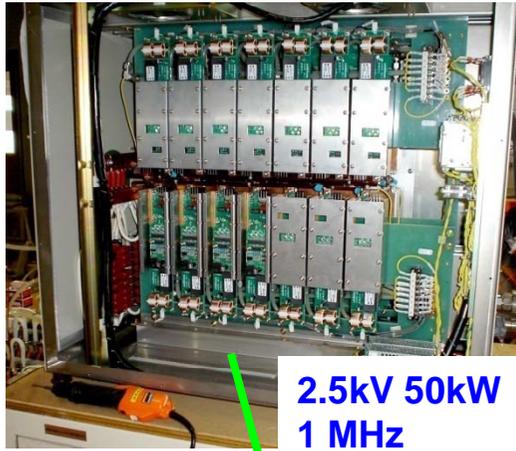
平成二十年度 二十一世紀発明賞



下崎 高山 鳥飼 荒木田

# KEKデジタル加速器のレイアウト

スイッチング電源

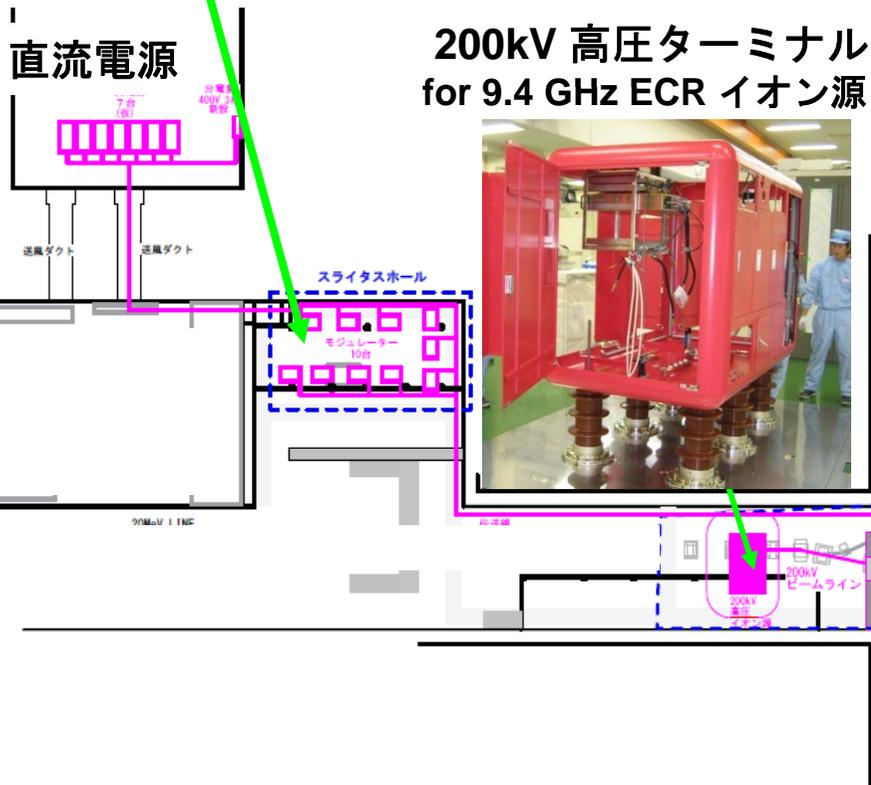


2.5kV 50kW  
1 MHz

誘導加速セル

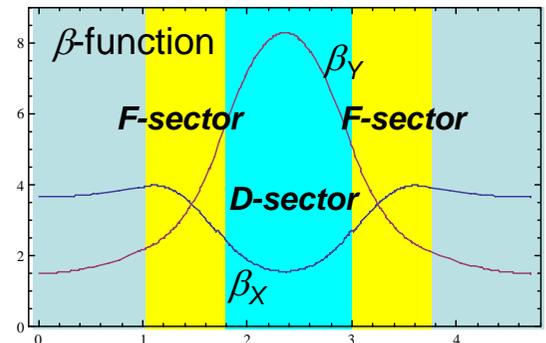


KEK デジタル加速器  
旧500 MeV Boosterシンクロトロン

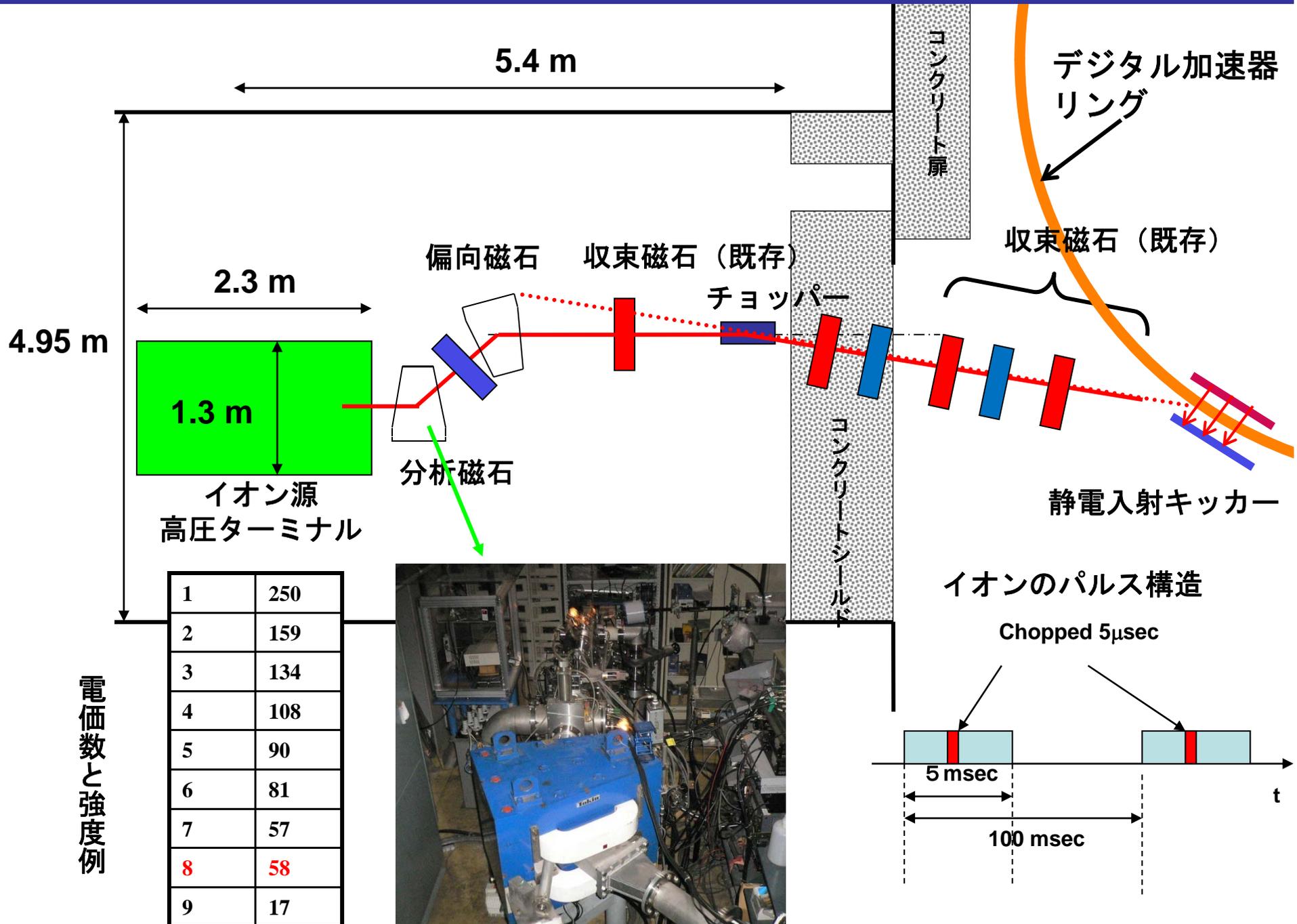


加速器パラメーター

偏向磁石曲率半径	3.3 m
加速器リング周長	37.7 m
最大磁束密度	1.1 T
周回当り最大加速電圧	3.24 kV
繰り返し	10 Hz
Betatron tune $\nu_x/\nu_y$	2.1/2.3



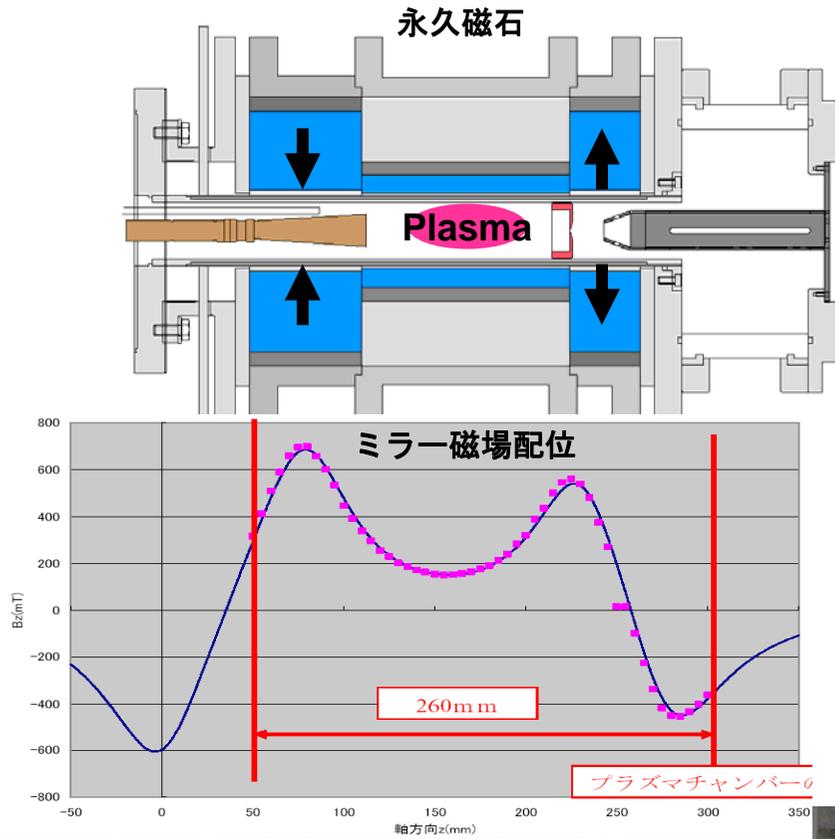
# KEKデジタル加速器上流域（イオン源と入射ライン）



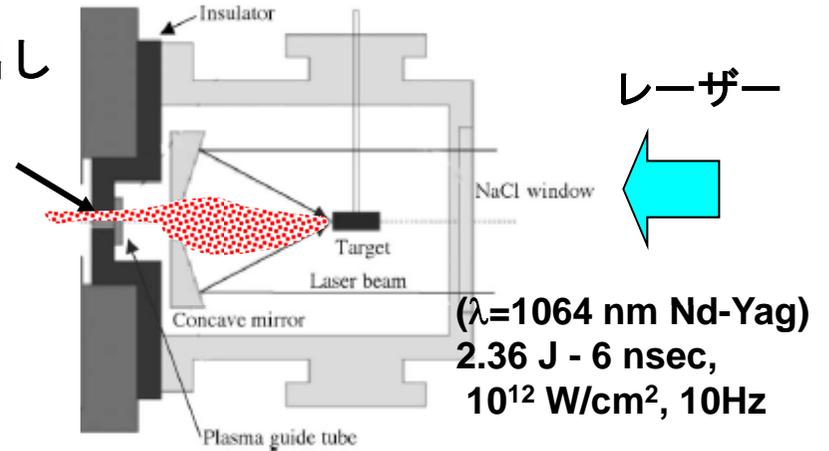
# イオン源

## ECR イオン源 (初期)

## レーザーアブレーションプラズマイオン源 (後期)



取り出し  
電極



完全イオン  
炭素イオン

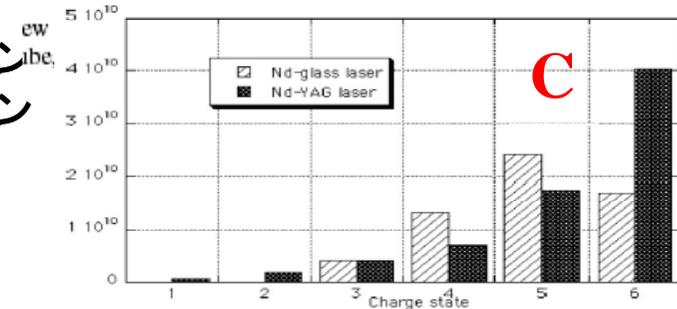


FIG. 2. Charge states distribution in carbon laser plasmas. The particle numbers are measured at 1 m from the target position within 1 cm<sup>2</sup>.

高電価数  
鉄イオン

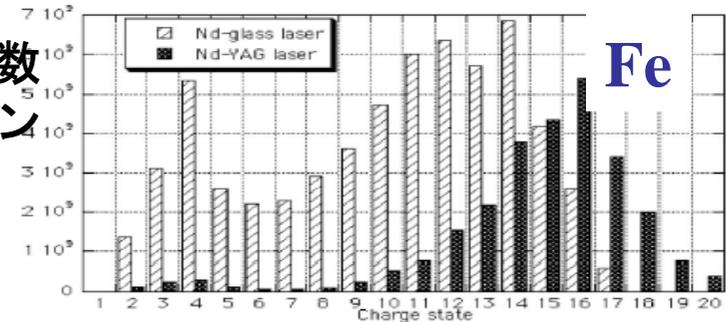
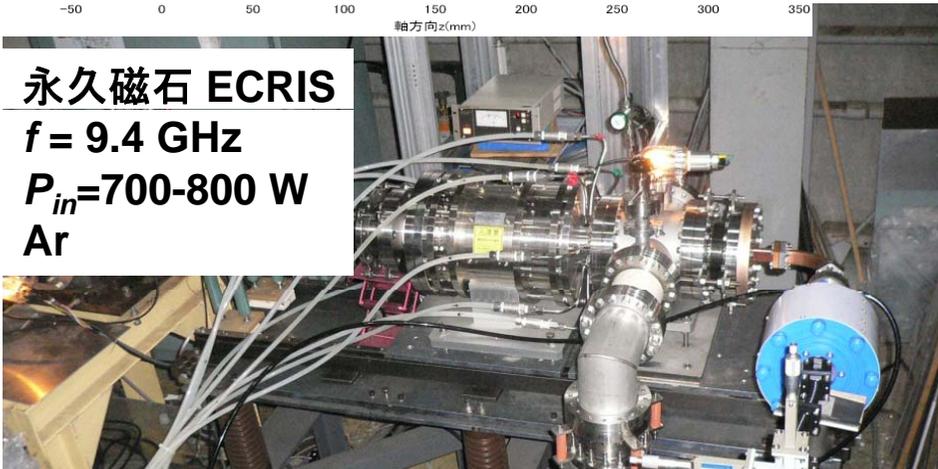
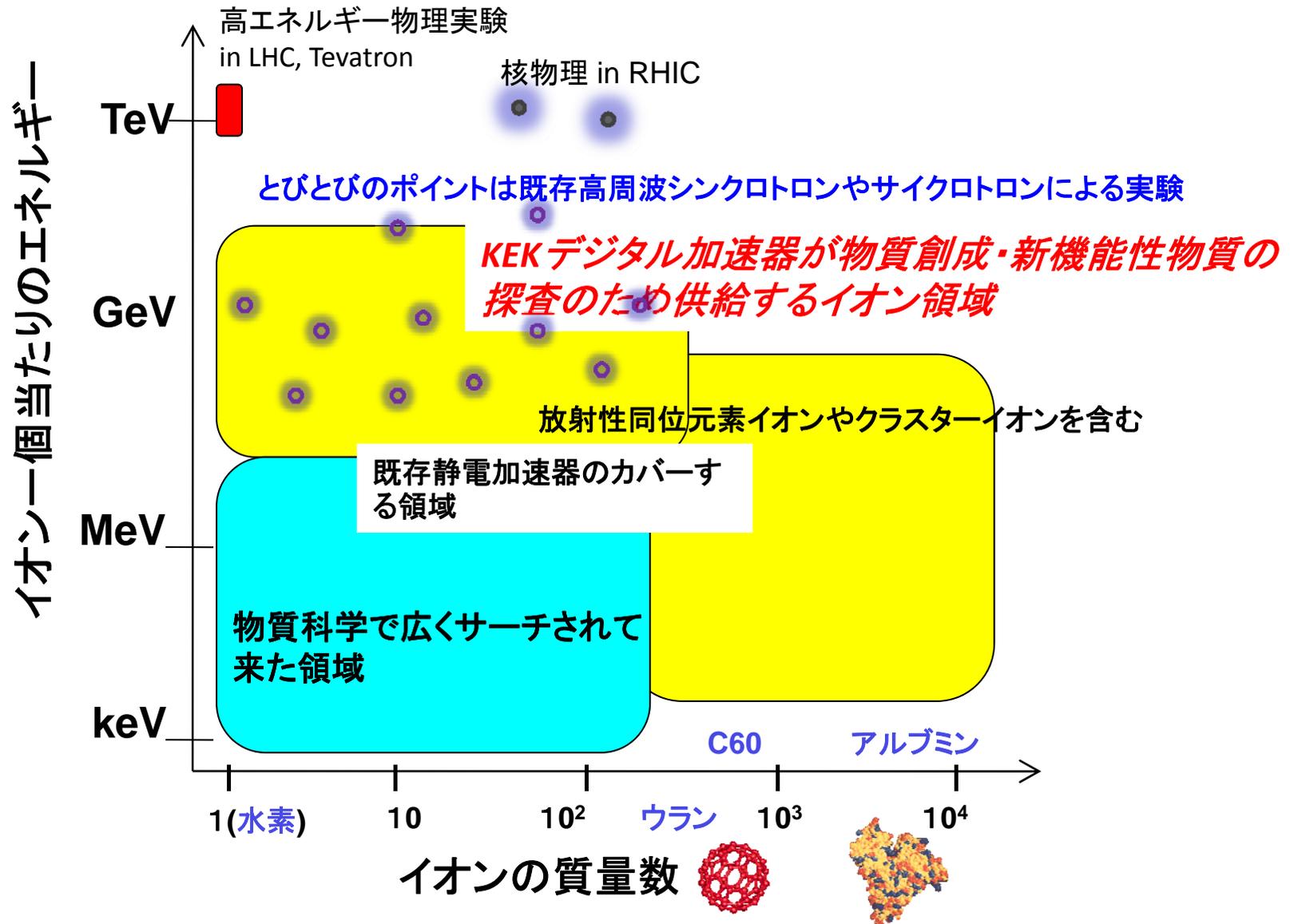


FIG. 3. Charge state distribution in iron laser plasmas.

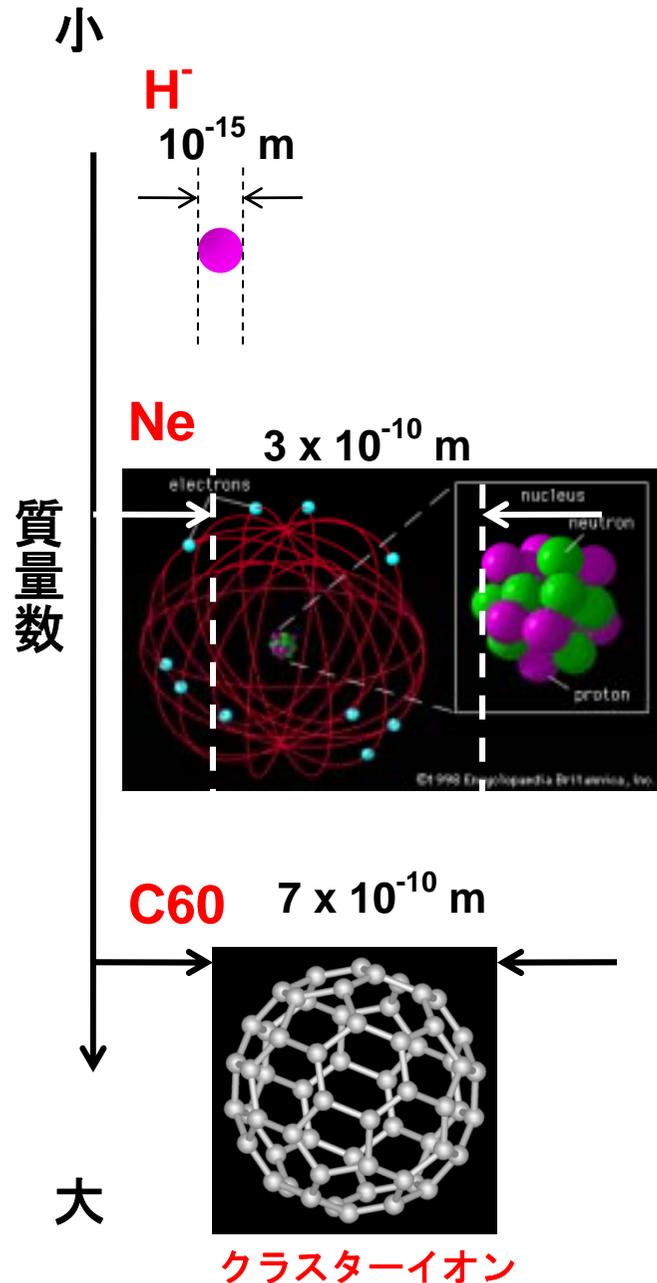
永久磁石 ECRIS  
 $f = 9.4$  GHz  
 $P_{in} = 700-800$  W  
Ar



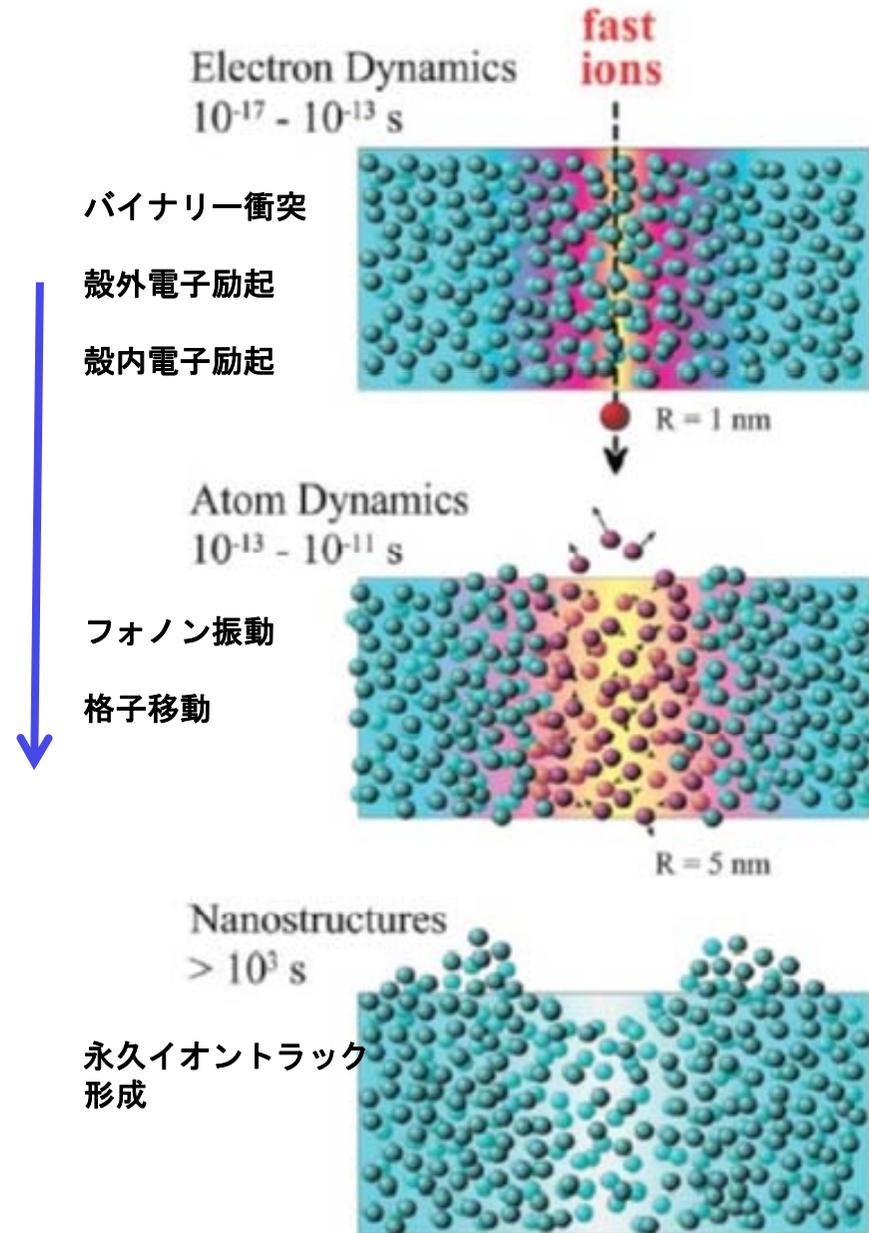
# KEK-DAとクラスターイオン専用機（超高真空DA） が提供するPlay Ground



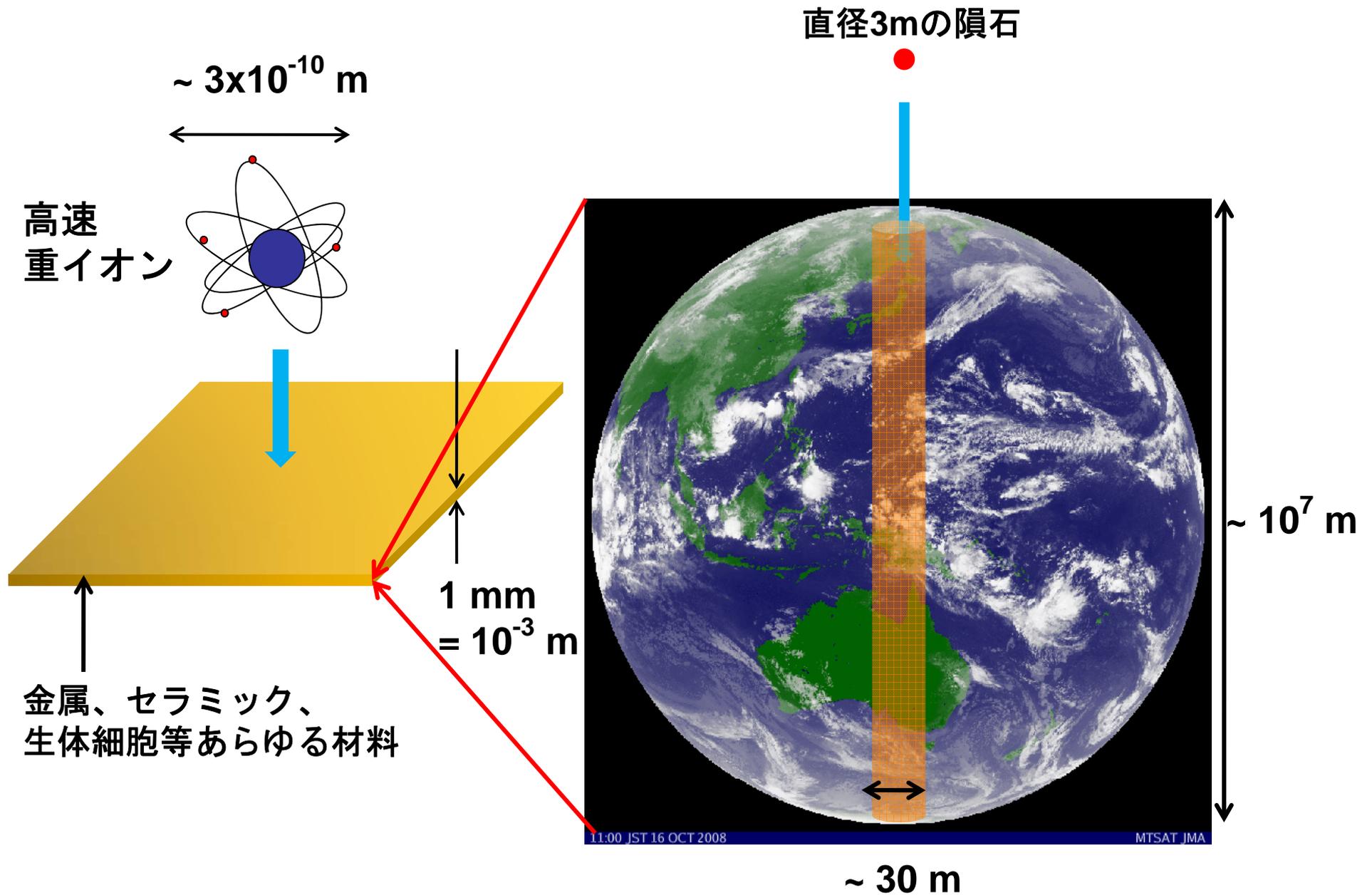
# 高速イオンが物質を直撃すると何が起こるか？



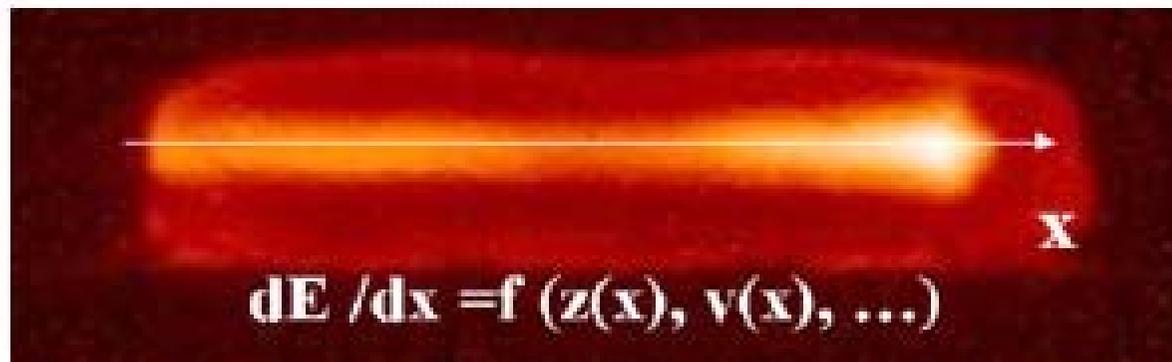
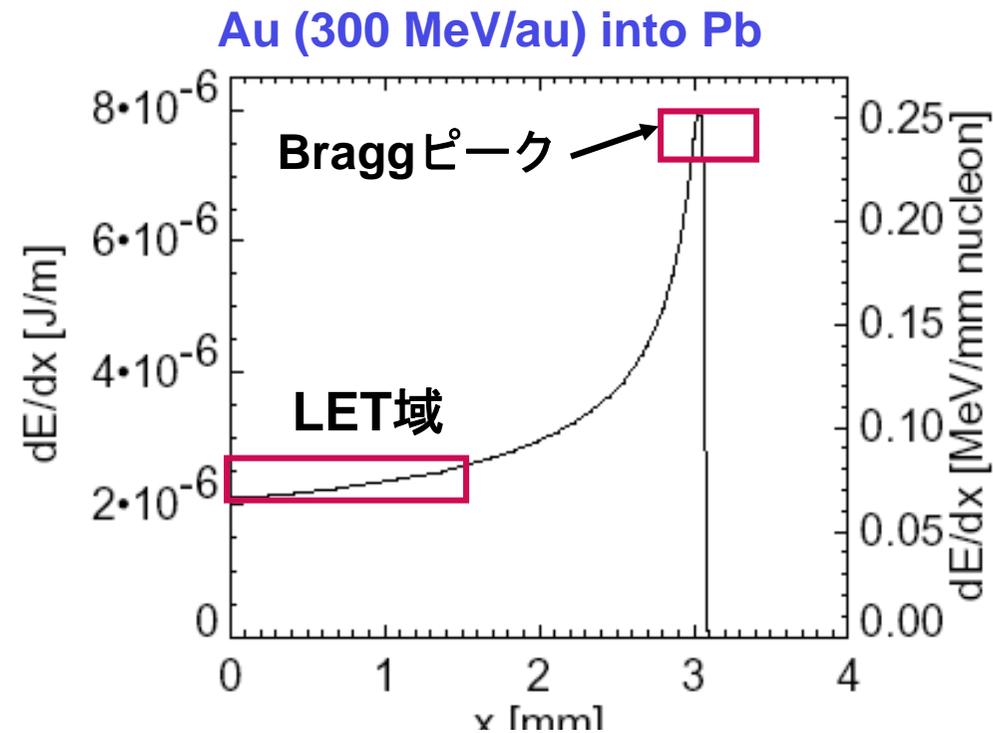
時間スケール



# 地球サイズでのアナロジー



# 物質中でのエネルギーロス

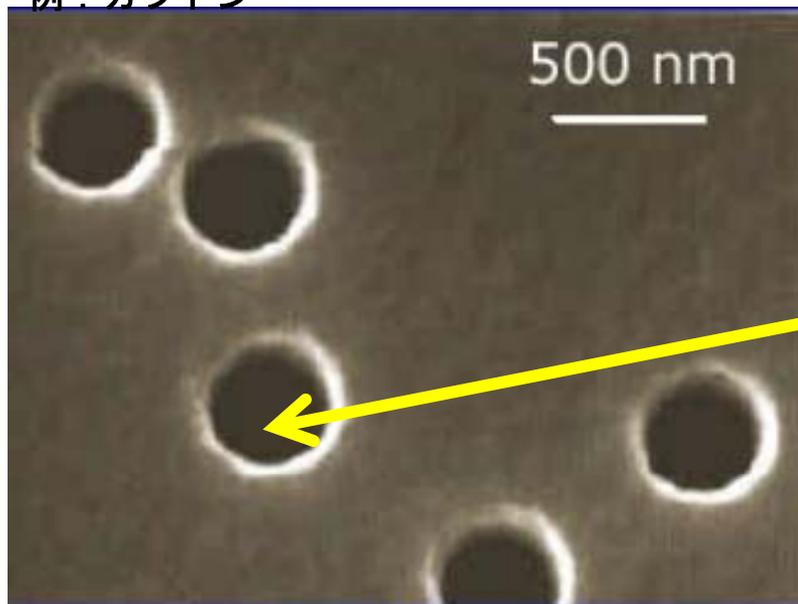


A 300 MeV/u Ar beam is penetrating into a Kr-crystal [ D.Hoffmann et al., NIM A577 (2007) 8-13

# エネルギーインプランテーションの例

Trautmann et al.,  
Nucl. Instr. Meth. B116, 429 (1996)  
例：カプトン

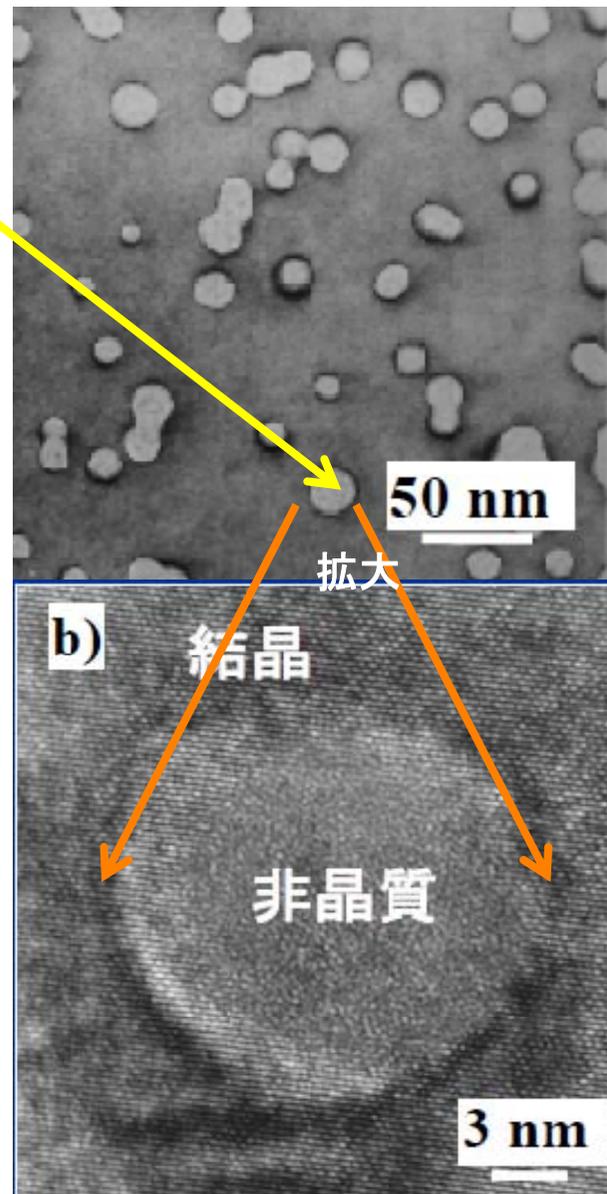
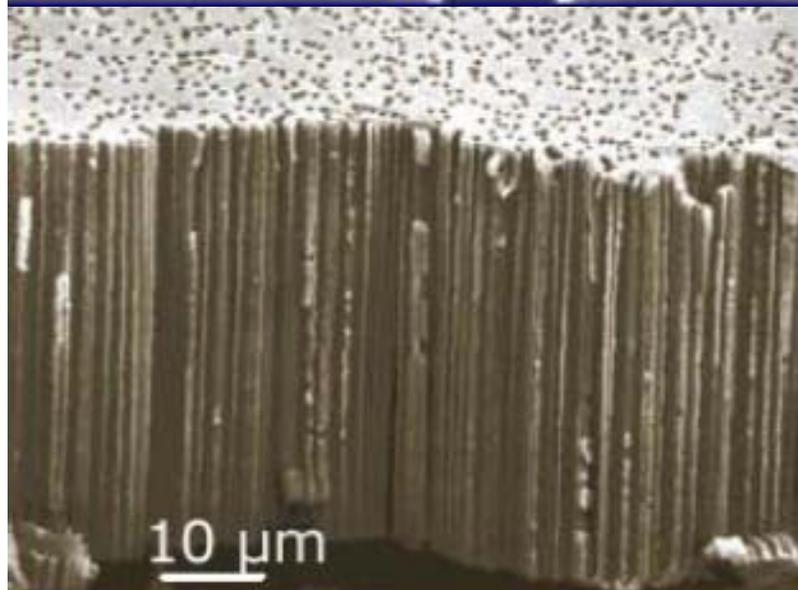
結晶（例えばFeSi<sub>2</sub> や人工ダイヤモンド）  
にイオンを照射



化学エッチンでイオントラックを拡大

イオントラック

血液中のウイルスフィルター



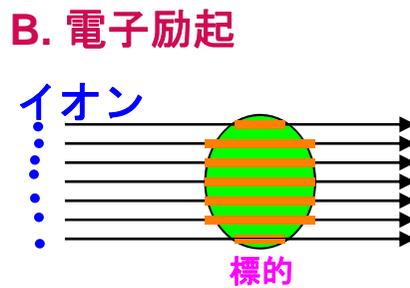
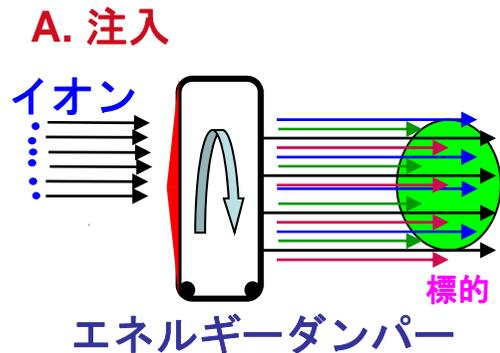
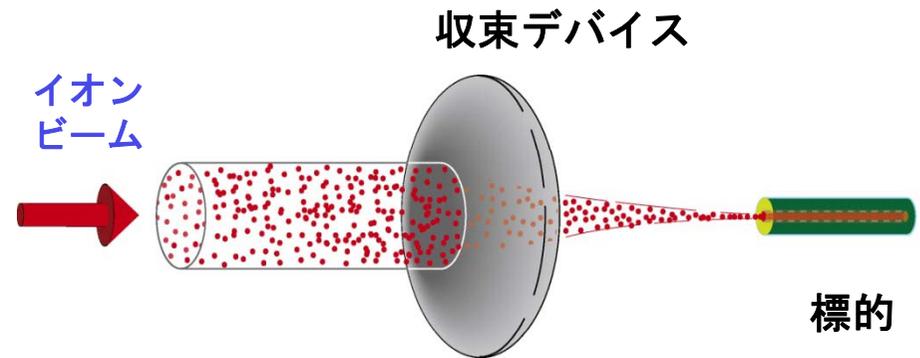
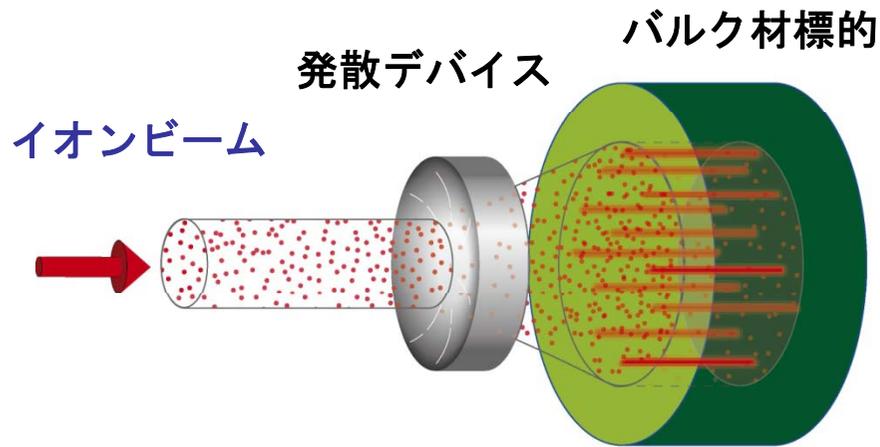
非晶質(導体)に変化

ナノメートルサイズの3次元電気配線

# 10MeV-10GeVクラスイオンの利用形態

A. バルクサイズ物質へのイオン注入  
B. 構成原子の電子励起による物質改変

C. 運動エネルギーの物質局部への付与



# 重イオンを用いた植物育種 (1)

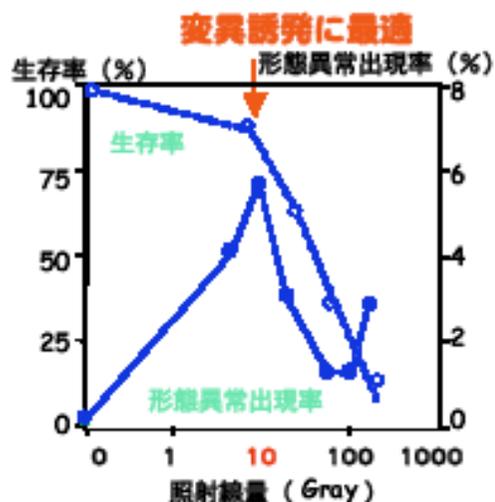
## (A) 重イオン

重イオン

放射線の種類	LET(keV/mm)
135MeV/u $^{12}\text{C}^{+6}$	20
135MeV/u $^{14}\text{N}^{+7}$	30
135MeV/u $^{20}\text{Ne}^{+10}$	60
95MeV/u $^{40}\text{Ar}^{+17}$	280



直接作用により  
ピンポイント切断  
DNA二本鎖切断  
欠失型変異



優良変異株選抜  
クローン増殖  
栽培評価

1.5~2.5年

0.5年

新品種花苗  
クローン増殖

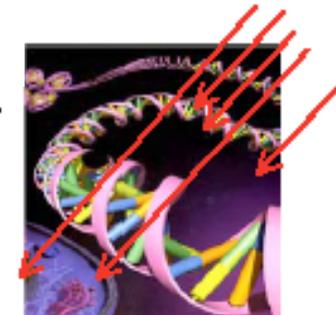
育種年限  
2-3年

窒素イオンはLETが大きいいため、  
変異誘発に適正な線量は低く、  
10Gyで十分である。そのとき細胞  
核におおよそ 200個のイオン  
が飛来する。

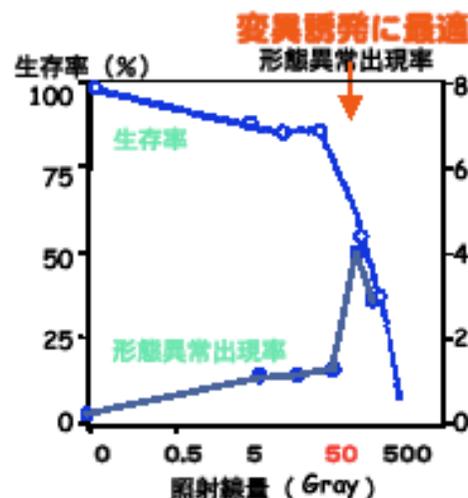
## (B) $\gamma$ -線, x-線

X線、ガンマ線

放射線の種類	LET(keV/mm)
$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 線	0.2
250kV X線	1.0



間接作用により多  
数切断  
DNA一本鎖切断  
ダメージ大  
巨大欠失型変異



優良形質を持つ変異株選抜  
交配による他の変異形質改善

5~8年

1~2年

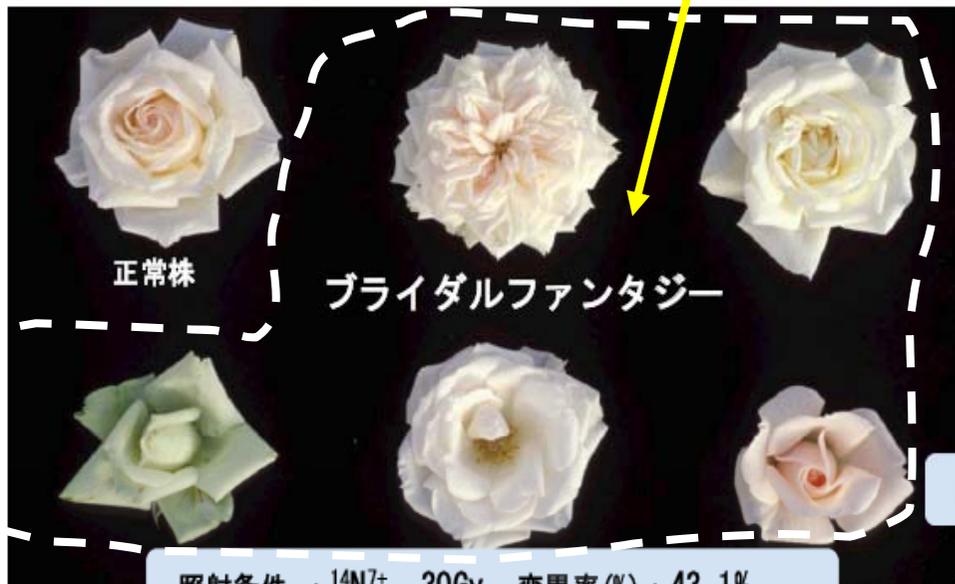
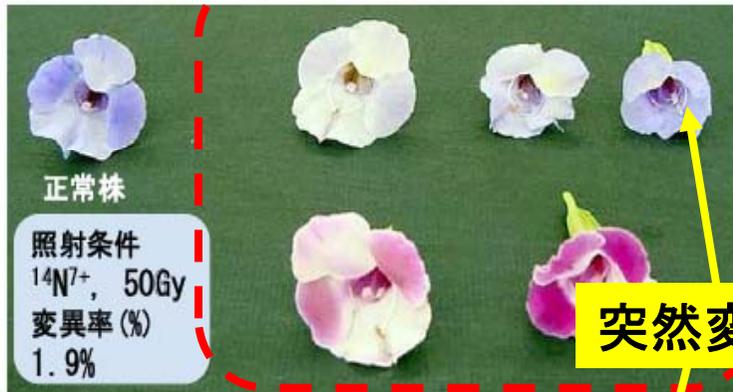
栽培評価  
クローン増殖

育種年限  
10年程度

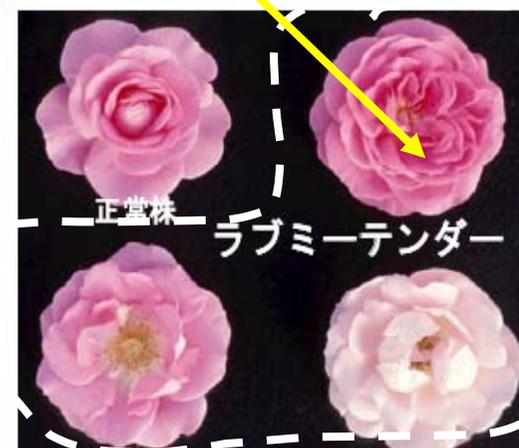
ガンマ線はLETが窒素イオンの1/150で小  
さいため、変異誘発に多くの線量を要する。  
適正な線量は50Gyであり、細胞表層のダ  
メージも大きくなる。

# 重イオンを用いた植物育種 (2)

育種例 by 阿部知子 (理研)



照射条件 :  $^{14}\text{N}^{7+}$ , 30Gy、変異率 (%) : 43.1%



照射条件 :  $^{14}\text{N}^{7+}$ , 10-20Gy、変異率 (%) : 20%

トレニア 共同研究 : サントリーフラワーズ (株)  
バラ 共同研究 : 神奈川県農業総合研究所

# 地球温暖化対応の穀物育種の必要性

D.B.Lobell (Lawrence Livermore N.L.) and C.B.Field (Carnegie Inst.),  
 “Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming”,  
*Environmental Research Letters* 2 014002 (2007)

に依れば、1981-2002までの世界の穀物（小麦、米、トウモロコシ、大豆、大麦）生産統計資料から、地球温暖化による生産減が顕著になったと報告している。

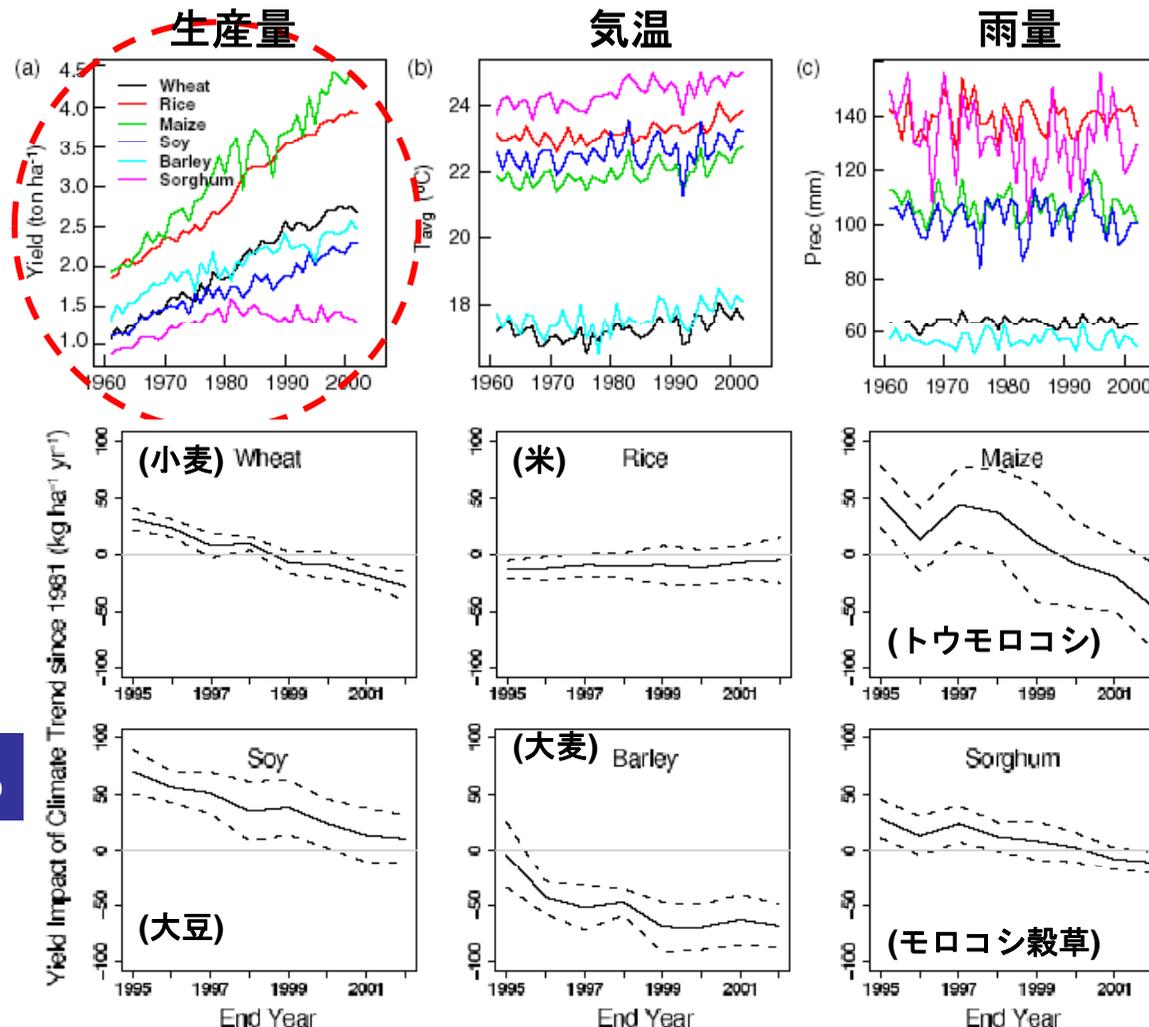
減産率 ~ 5.4 - 9 %/摂氏1度

21世紀末までに予想される  
 平均気温上昇  
 (2007年12月環境省発表)

摂氏4.7度

予想される減産率25% - 40%

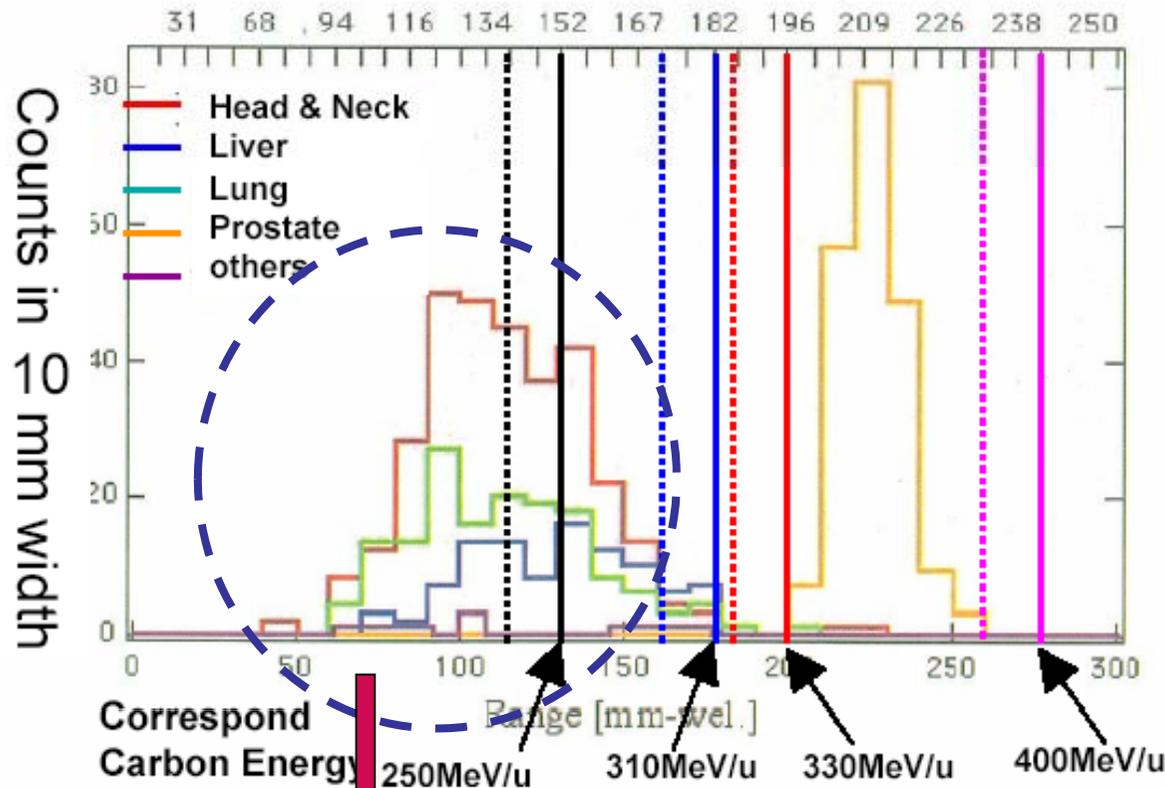
遺伝子組み替え+重イオン育種  
 による新品種の戦略的創出が  
 唯一の対策だろう。



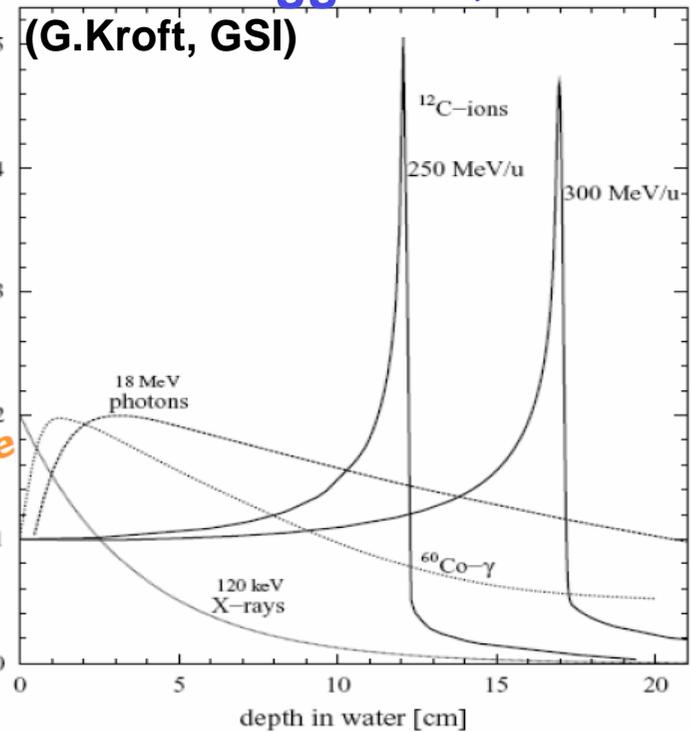
# 粒子線治療（ガン部位と照射深度）統計

ガンセンター資料

Proton energy (MeV)



Bragg ピーク



多くのガンは比較的浅い部分にある。

鋭いブラッグピークが望ましい。

水素より重い炭素がより良いが、炭素用加速器は相対的に大型になり、お金がかかる

水素イオン・炭素イオンを供給するハイブリッド方式

デジタル  
加速器

H-ion (深部ガン用)

250 MeV

C-ion (中、浅ガン用)

310MeV/au ( $C_0=45$  m)

医療施設

# 粒子線ガン治療施設普及の実態

## 日本の粒子線治療施設

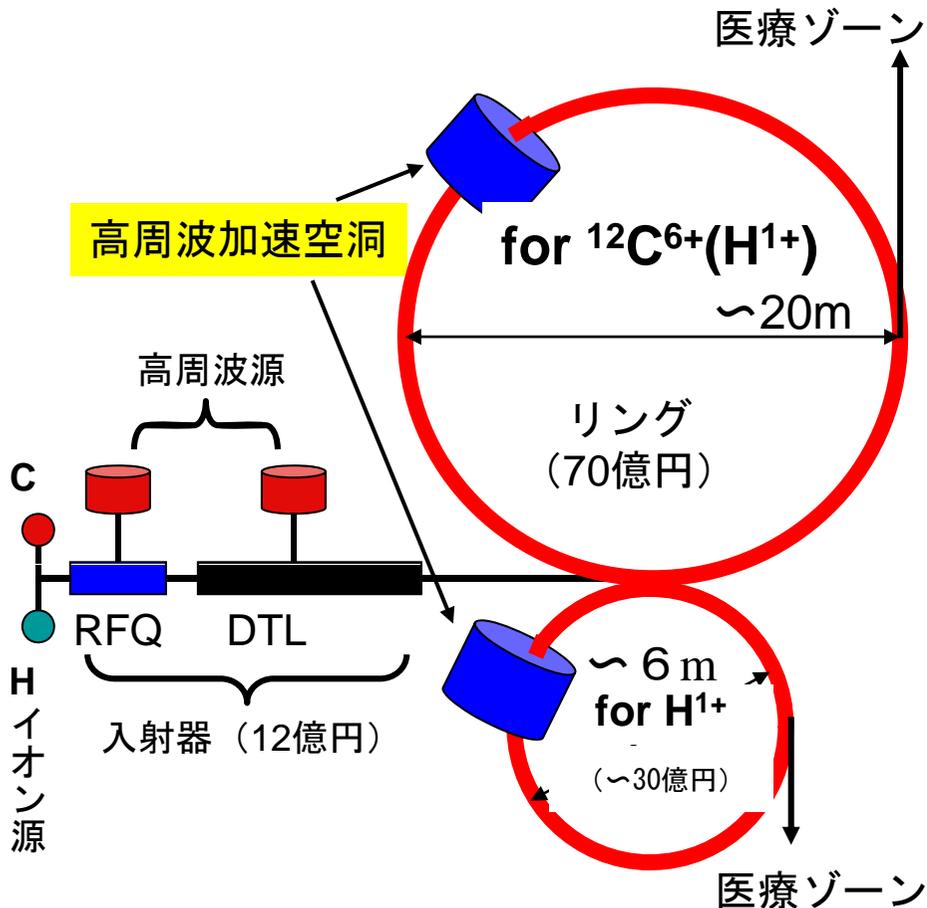
- 陽子線
- 炭素線(重粒子線)
- 中性子



# 次世代粒子線ガン治療用加速器

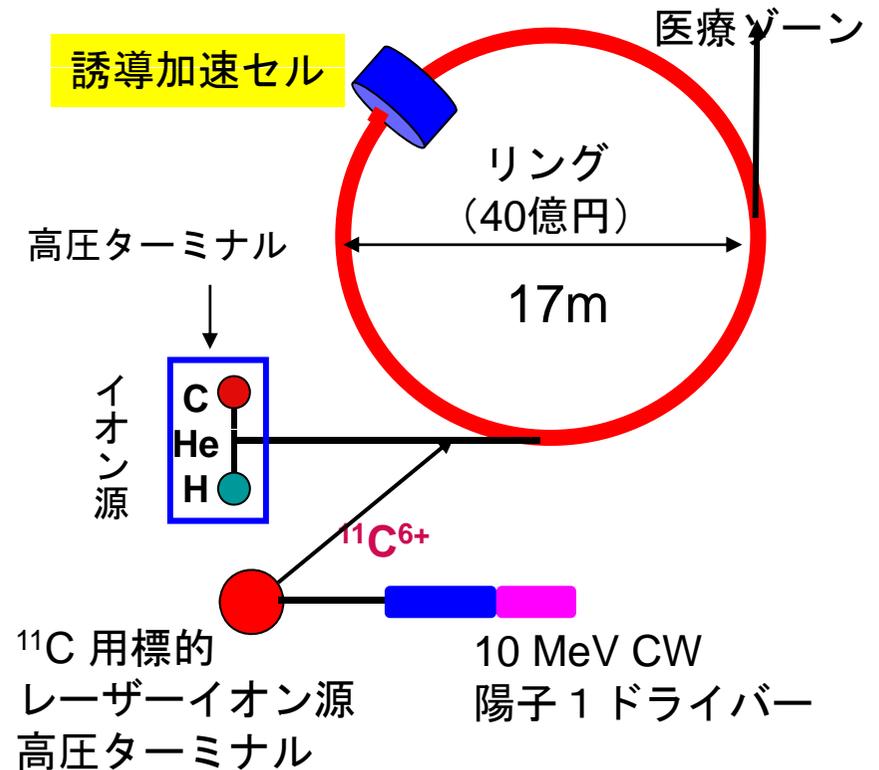
## 既存スキーム (高周波シンクロトロンに基づく)

種	エネルギー	特徴と対象
$^{12}\text{C}^{6+}$	400 MeV/au	sharp Bragg peak, 浅-深部ガン
$^1\text{H}^{1+}$	250 MeV/au	浅-深部ガン

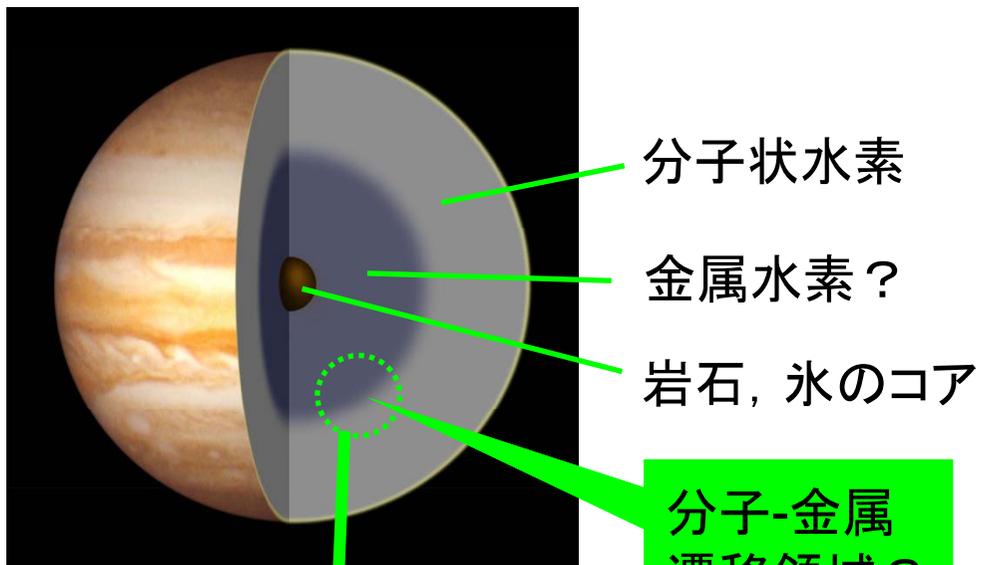


## 新スキーム (デジタル加速器に基づく)

種	エネルギー	特徴と対象
$^{12}\text{C}^{6+}$	300 MeV/au	sharp Bragg peak, 浅/中深度ガン
$^3\text{He}^{2+}$	300 MeV/au	relatively sharp Bragg peak reduced fragmentations Cより大きな加速効率
$^1\text{H}^{1+}$	250 MeV/au	深部ガン、大きな加速効率
$^{11}\text{C}^{6+}$	300 MeV/au	sharp Bragg peak, 浅/中深度ガン real-time targeting feedback

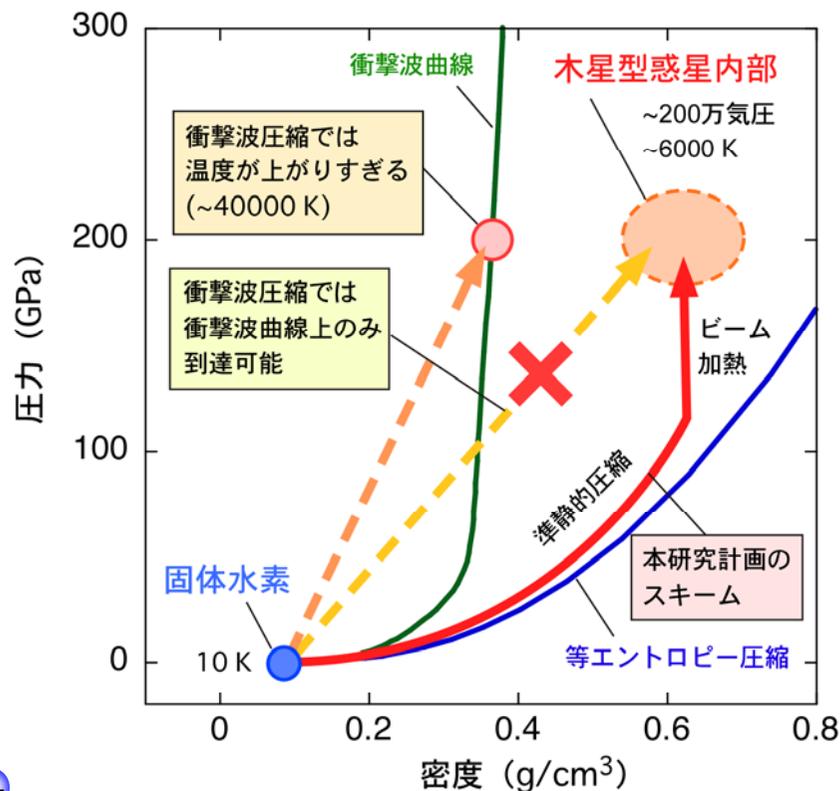
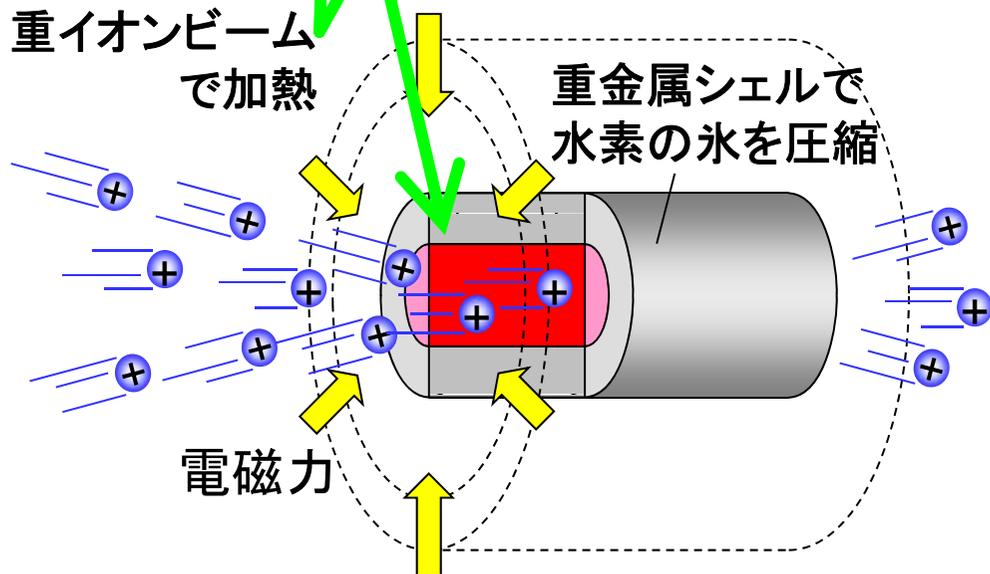


# 重イオンビームを利用した実験室天体物理(2)



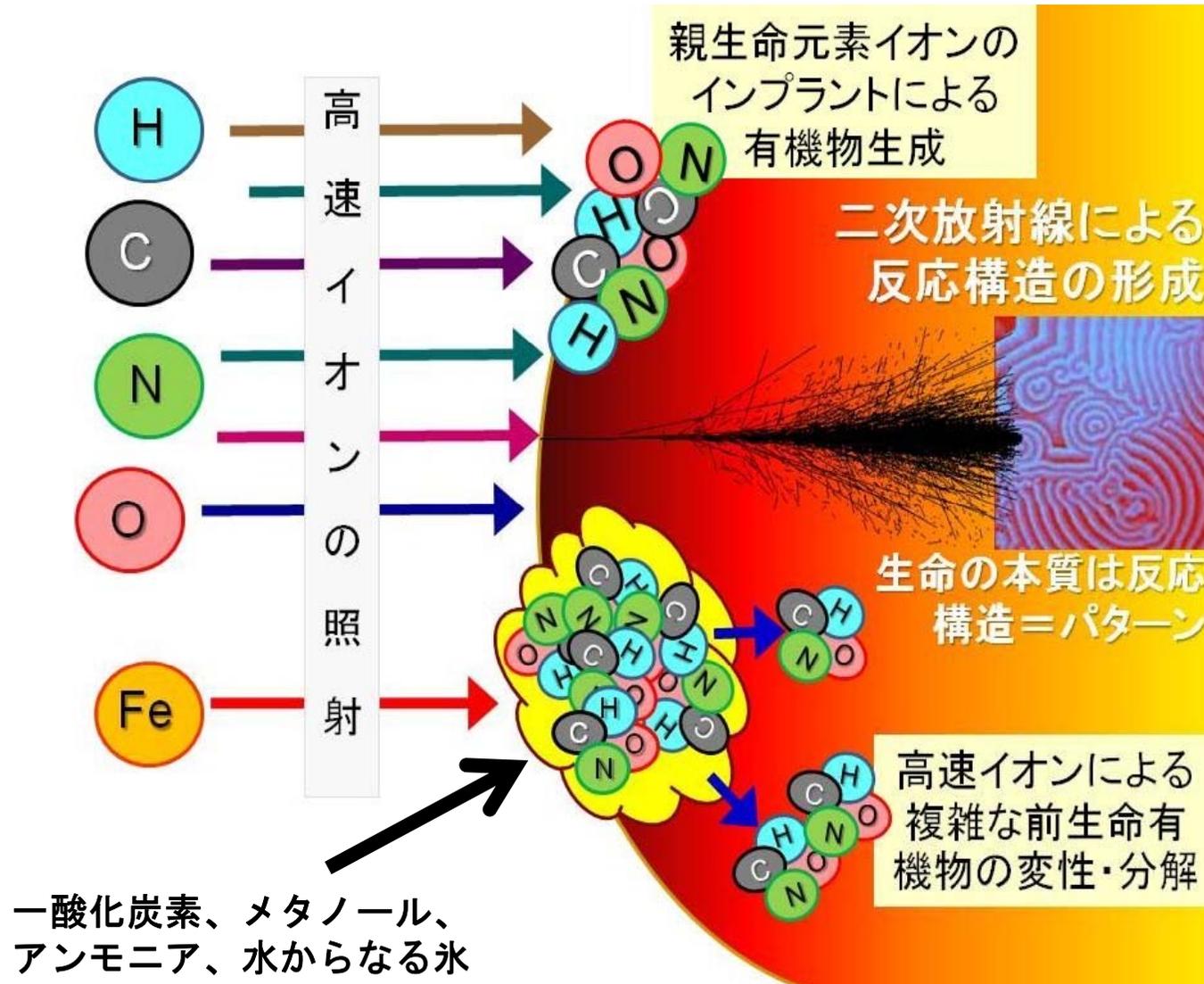
分子-金属  
 遷移領域？

(200万気圧, 6000度)

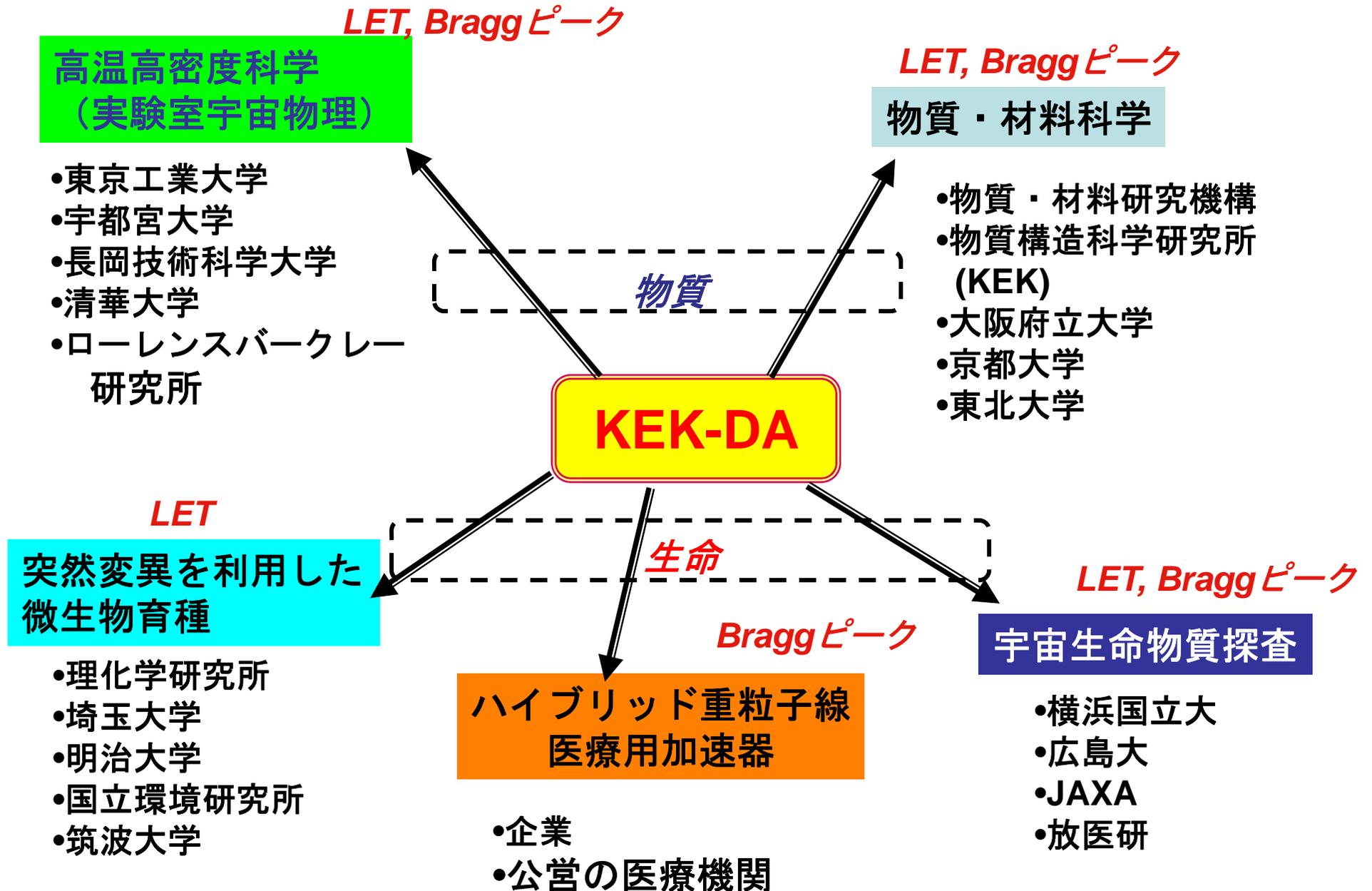


# 宇宙生命体の起源を追求：生体有機物の人工的生成

星間、特に分子雲環境下で宇宙線と星間物質との相互作用により、  
生体有機物や生命機能を有する有機物（アミノ酸等）の生成が起こりえるのか？



# 応用研究と予定されているユーザー一覧



## まとめ & デジタル加速器とあなたとの関係は？

- 加速と粒子閉じ込めを分離、スイッチング電源で駆動する事により周回周波数のバンド幅を一気に**5桁**増やし得るので、あらゆるイオン種を取り得る可能な入射速度 $v$  ( $v/c=0\sim 1$ )に対応して繰り返し加速が可能
- デジタル加速器は既存の加速器サイズを1/10, 1/100とかに小さくできるわけではないが、10, 100台分に相当する働き
- **新しい学問を拓く道具、物作りの道具として寄与**
- 加速器の心臓部である誘導加速装置に使用する**ハイパワー半導体素子**とトランスの**磁性体**は今後の更なる進化が期待できるので、コンセプトをそのままに加速器の性能は継続的に上がる（効率化、小型化）

