

# 準相対論的巨大大クラスターイオン用の誘導加速マイクロトロン

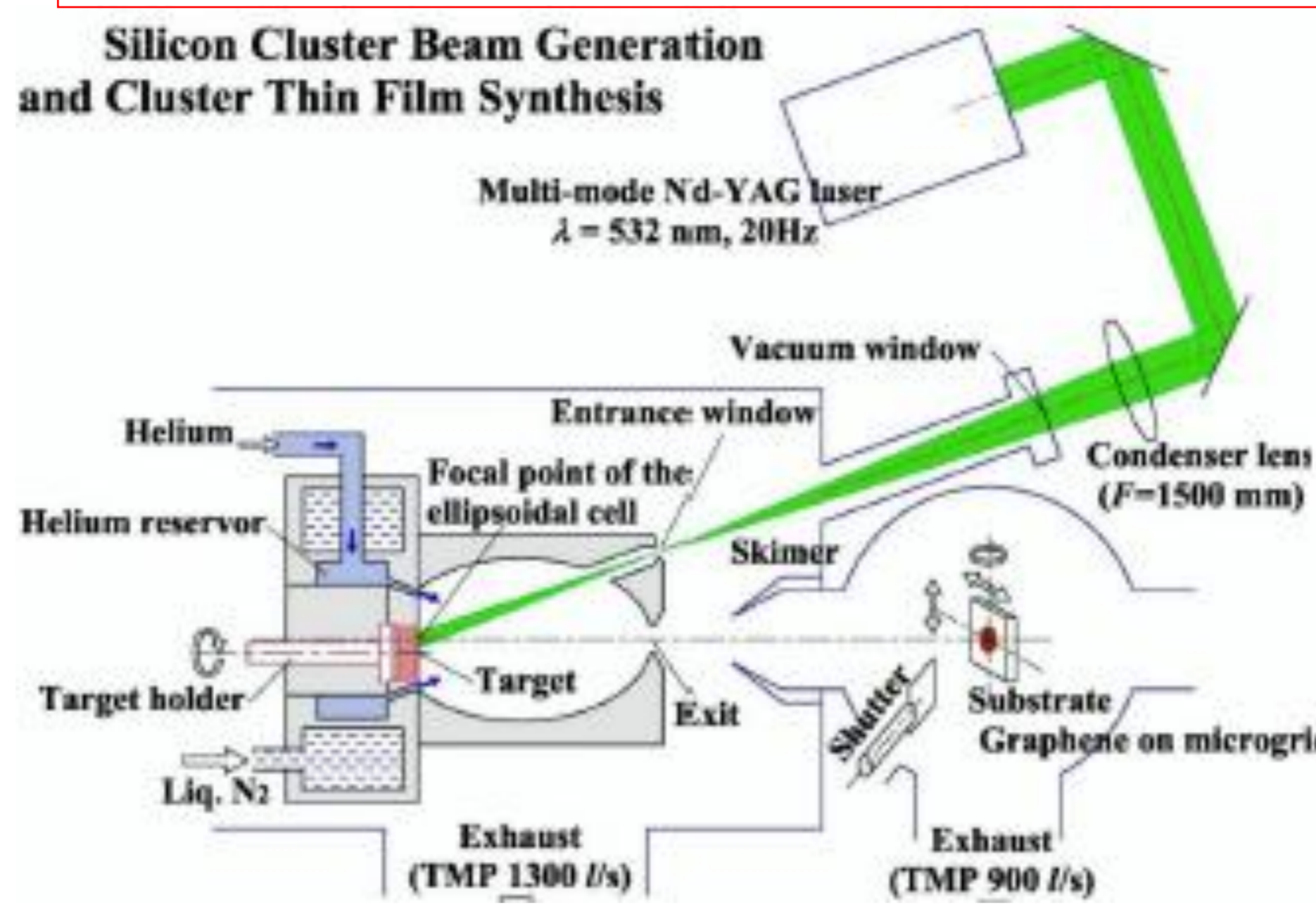
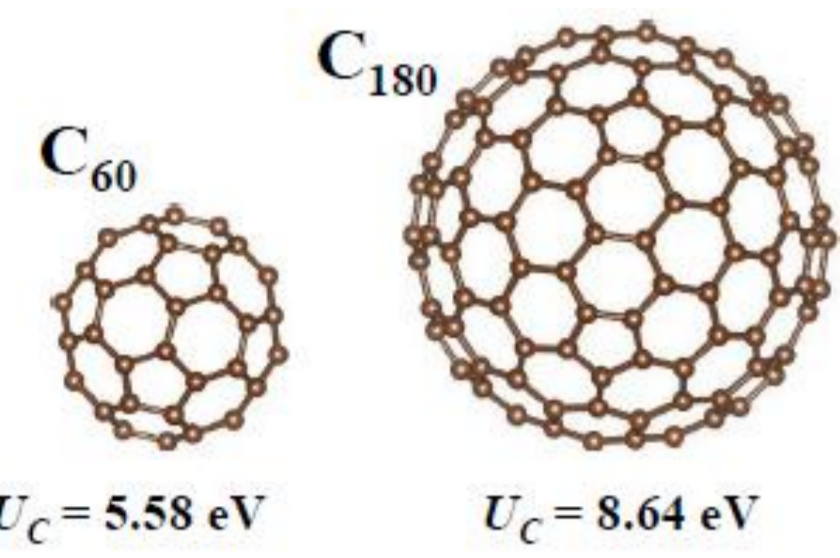
高エネルギー加速器研究機構、産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学  
東京工業大学、量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所の共同研究

## 1 巨大大クラスターイオンとは何か？ どうやって作るのか？

元素原子が共有結合をしている安定な複合体

産総研 時空間閉じ込め方式クラスター生成装置

例： フラーレン



## 2 第4世代の量子ビーム

加速器で供給する量子ビーム

質量比

- 1 電子 1897
- 2x10<sup>3</sup> 陽子 1932
- < 4x10<sup>5</sup> 重イオン
- < 1.2x10<sup>7</sup> クラスターイオン 1991

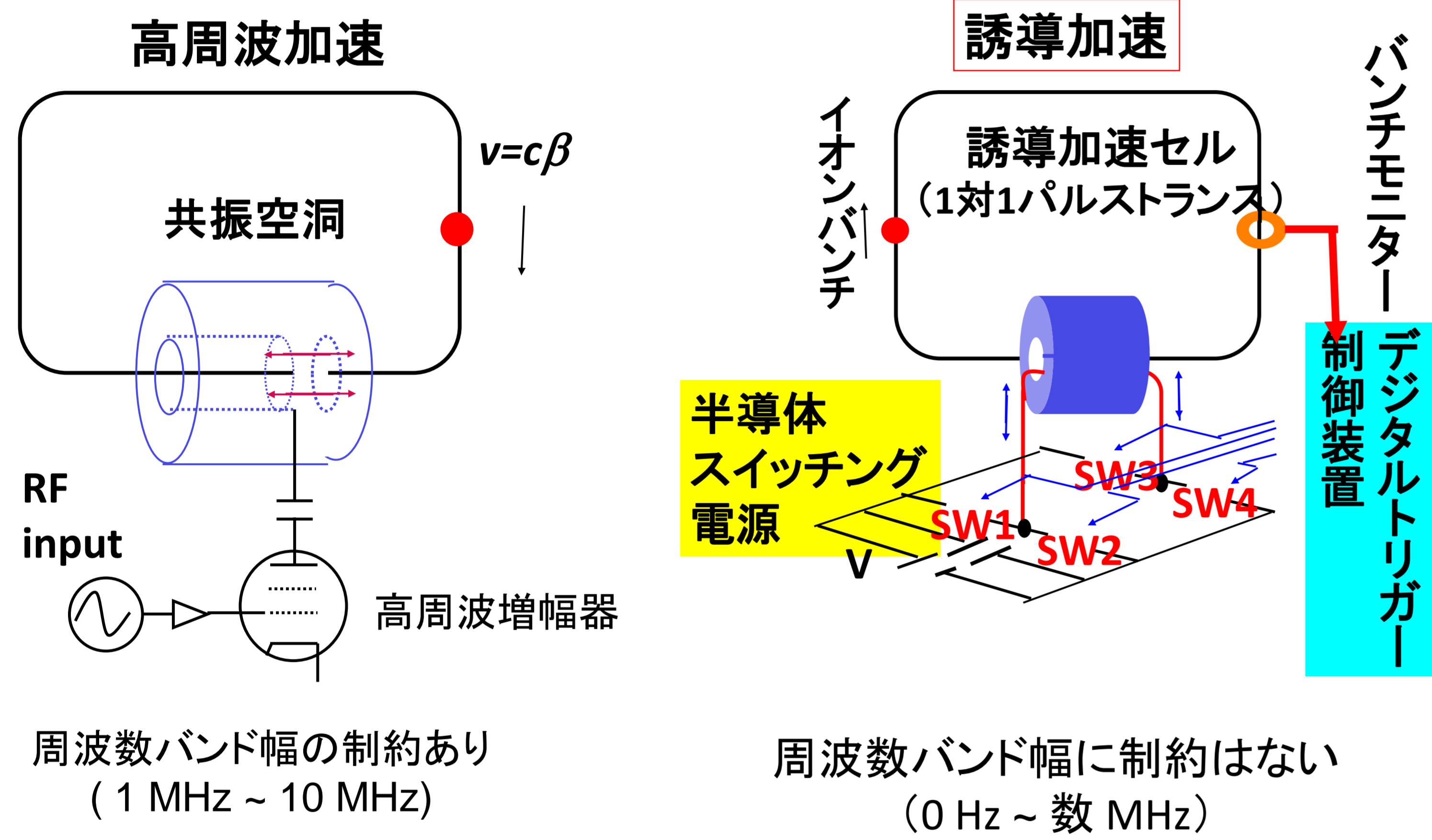
(2次粒子)

- (放射光) 光子
- 中性子
- 中間子
- 放射性
- 同位元素

応用分野

- 高エネルギー物理
- 原子核物理
- 原子・分子科学
- 材料科学
- ナノ物質科学
- 医療応用 (X線、サイバーナイフ、ガンマーナイフ、PET、SPECT用核薬品、陽子線・炭素線ガン治療ドライバー)
- 原子力エネルギー (核融合炉壁材料開発、核消滅処理、慣性核融合)
- 産業応用 (イオン注入材料創製、表面処理、物質内元素トレース)
- 非破壊検査
- イオンビーム解析: PIXE, RBS, PIGE, AMS
- 大規模殺菌
- 排水・排ガス処理
- 農業 (穀物・花卉育種)
- 環境・エネルギー (微生物育種)

## 3 とてつもなく重いこのイオンをどうやって加速するのか？



巨大大クラスターイオンのリング内周回周波数 → kHz ~ 0.5 MHz

## 4 どのような加速器で加速できるのか？

得られる最大エネルギーは使用する偏向磁石の磁気剛性(磁束密度×曲率半径)によって決まる: 静電加速電圧相当と比較すると

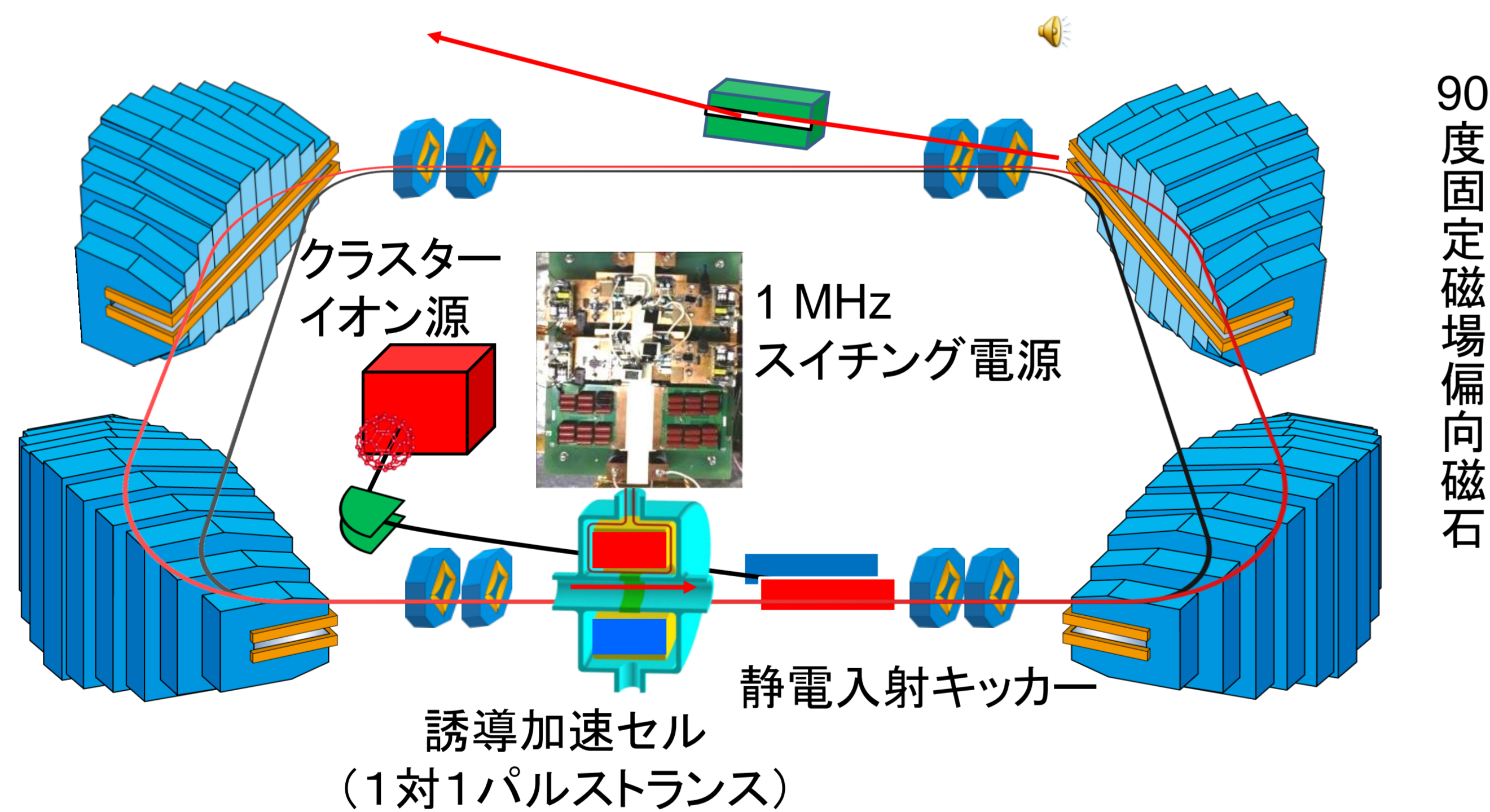
$$V[\text{volt}] = \left( \frac{A}{Q} \right) \cdot \frac{mc^2}{e} \cdot \left( \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{Q}{A} \right) \cdot \left( \frac{e}{mc^2} \right) \cdot c \cdot B\rho \right]^2} - 1 \right)$$

Vを大きくするには磁気剛性  $B\rho$  を大きくするしかない。

A: クラスターイオンの質量数、Q: 価数  
B: 磁束密度、 $\rho$ : 曲率半径

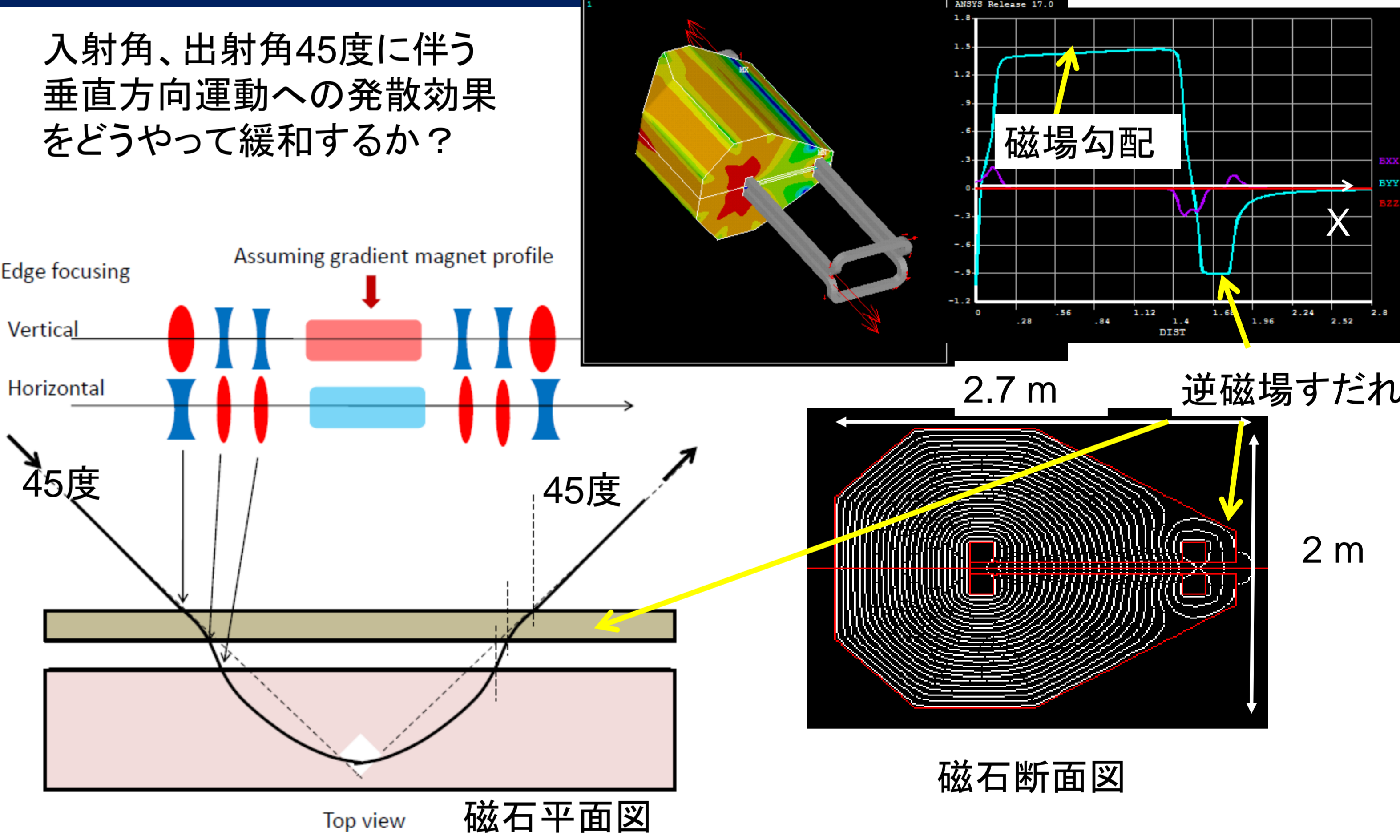
タイプ	磁束密度 B (テスラ)	曲率半径 $\rho$ (m)	長所/短所
誘導加速シンクロトロン	可変 < 1.5 (常伝導) < 8.5 (超伝導)	固定	•最大1.5テスラなら、魅力的エネルギーにならない •最大8.5テスラなら、入射磁場が低すぎて不安定
誘導加速マイクロトロン	固定 (~ 1.5)	可変 (大きな半径が可能)	•誘導加速方式は誘導加速シンクロトロンと同じ物が利用可

## 5 誘導加速マイクロトロン



Ken Takayama, Toshikazu Adachi, Masayoshi Wake, and Katsuya Okamura, "A Racetrack-shape Fixed Field Induction Accelerator for Giant Cluster Ions", Phys. Rev. ST-AB 18, 050101(2015).

## 6 特殊な偏向磁石 (逆磁場すだれと勾配)



## 7 高速のクラスターイオンで何をやるのか？ 新しい物質科学の展開

固体中(半導体基盤物質、金)に極限非平衡状態の創出 → 急冷 → イオン通過軌道上(径数nm、長さ数 $\mu\text{m}$ )に恒久的な物質の相転移が出現

結晶 → 非晶質化、他結晶相への転移  
非晶質材料 → 他非晶質への転移

イオントラック形成  
イオントラック: 数nm径、数 $\mu\text{m}$ 長の円柱状の変質領域

金属材料の物質中整形  
例外的に小さな電子阻止能  
MeV

重イオンでは重要半導体 (Si, GaAs, GaN, SiC, ZnO) の電子阻止能の限界を越えられない

一般の結晶で表面金属ナノ粒子の整形 → 光導波路の形成

新材料への展開

## 8 微生物育種

重イオン  
ガンマー線  
C-60イオン

1  $\mu\text{m}$   
2 nm  
220 nm  
400 Gy, 18.3 MeV/核子  
LET=100 keV/ $\mu\text{m}$

2 nm  
10 nm  
1 MeV/核子  
LET > 60x800 keV/ $\mu\text{m}$   
= 4.8x10<sup>4</sup> keV/ $\mu\text{m}$

生成する2次電子が高密度生成  
コア領域とのオーバーラップ、DNA巨大分子の解離

構造変化による新規ゲノム創成  
高LET  
超高LETクラスター  
高効率遺伝子欠失  
低LET  
低LETクラスター

多様な突然変異種の出現  
染色体の構造変化の割合  
欠失サイズ

損傷DNAの修復に失敗して  
死滅した細胞  
細胞死とドーズの関係

生成する2次電子が局所的に高密度で生成コア領域での水加熱に拠って発生するマイクロ衝撃波による圧力差に起因するDNA巨大分子の解離