

2003年4月26日 第1回FFAG研究会(FFAG倶楽部)

加速器駆動原子炉研究の 現状と将来

京都大学原子炉実験所 代谷 誠治

- 加速器駆動原子炉とは？
- 加速器駆動原子炉の特徴と革新性
- 加速器駆動原子炉開発上の課題
- 京都大学原子炉実験所における研究
- 加速器駆動原子炉研究の将来

加速器駆動原子炉とは？(1)

より正確には、加速器駆動未臨界炉 (ADSR)

加速器で未臨界状態の核燃料体系を駆動するシステム

未臨界状態の核燃料体系 停止中の原子炉

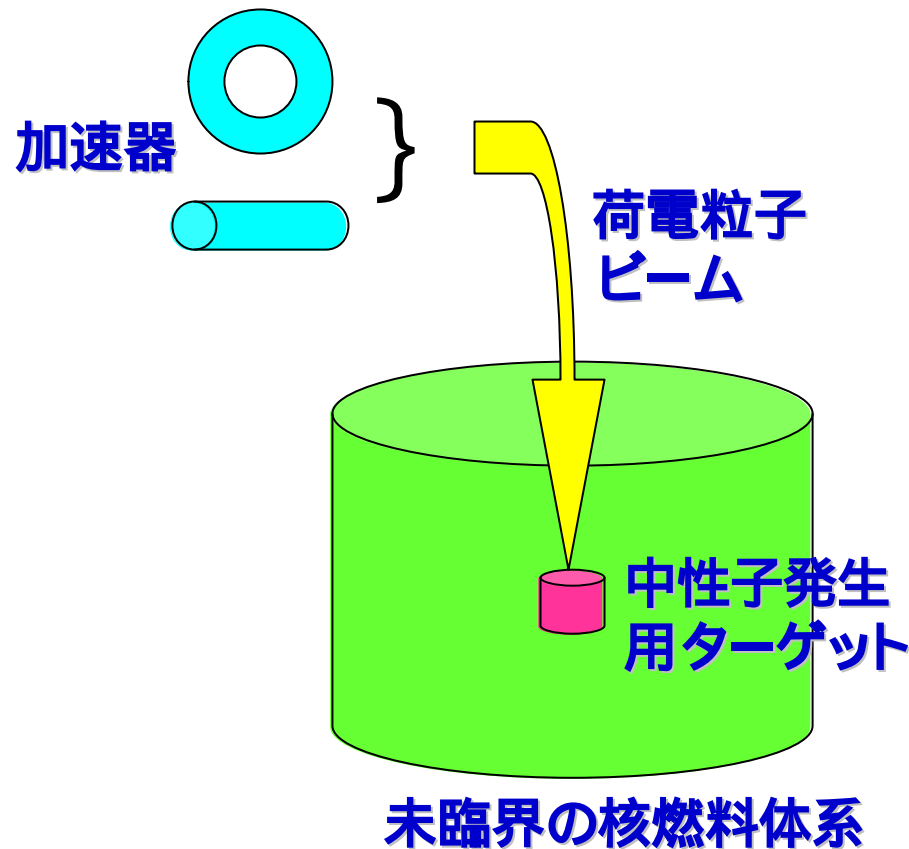
外部から中性子源を供給し続けなければ、核分裂の連鎖反応は持続しない。

未臨界の核燃料体系で核分裂連鎖反応を持続させる(未臨界炉を稼働させる)ためには中性子源が必要不可欠

未臨界炉の出力(P)は中性子源強度(S)と未臨界核燃料体系の実効増倍率(k_{eff})に依存 $P=AS/(1-k_{\text{eff}})$

加速器 ・ 強力な中性子発生装置(中性子源)として利用

加速器駆動原子炉とは？(2)



ターゲットで発生した中性子は未臨界体系中で核分裂の連鎖反応により増倍される

中性子の利用

- 核燃料増殖
- 核変換処理
- 研究用中性子源

核分裂エネルギーの利用

- エネルギー増幅器

加速器駆動原子炉とは？(3)

ADS開発研究の歴史

加速器と未臨界集合体のハイブリッドシステムは原子力開発の初期の頃から注目されていた

➤ 核融合 - 核分裂ハイブリッドシステム

燃料増殖機能に注目

➤ 加速器技術の発展・・・高エネルギー粒子加速器の開発

➤ 核破砕－核分裂ハイブリッドシステム

核廃棄物の核変換処理機能に注目

ルビア博士がエネルギー増幅器概念を提唱

加速器駆動原子炉の特徴と革新性(1)

加速器中性子源で未臨界定常状態を実現

加速器の運転を停止すれば核分裂の連鎖反応が停止

安全な原子力システムとなる可能性あり

加速器駆動原子炉は原子炉か？

臨界になることがあるか、ないか？

臨界になる可能性があれば原子炉となる

臨界になる可能性がなければ原子炉にはならない

核燃料取扱施設？

加速器駆動原子炉の特徴と革新性(2)

加速器駆動原子炉の出力(P)は概ね中性子源の強度(S)と未臨界燃料体系の実効増倍率(k_{eff})で決まる

$$P = AS / (1 - k_{\text{eff}})$$

ここに、 A : 比例定数

加速器駆動原子炉の出力制御方式

S の調整

加速器ビーム電流の調整

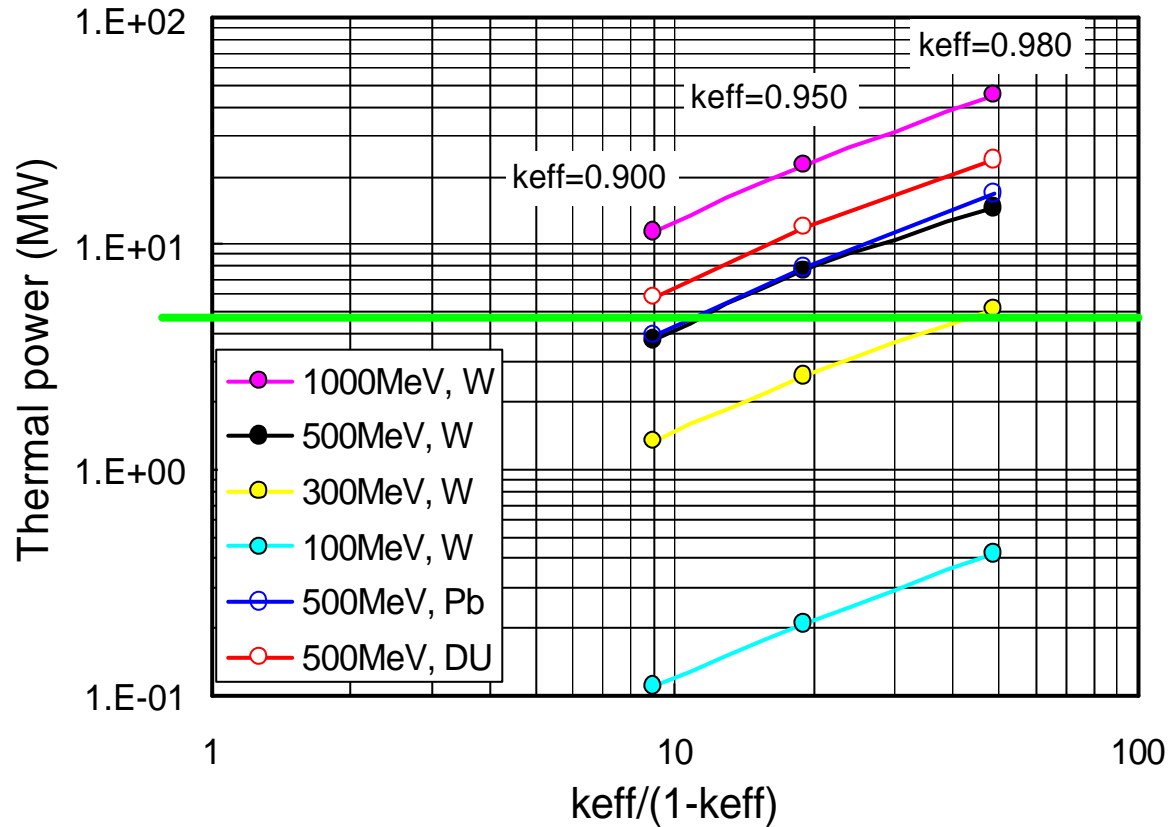
加速粒子エネルギーの調整

k_{eff} の調整

制御棒等で調整

中性子発生反応としては、反応あたりに大量の中性子を発生する核破砕反応の利用が有力視されている。高エネルギーかつ大電流の加速器開発が不可欠

加速器駆動原子炉の特徴と革新性(3)



実効増倍率、入射陽子エネルギーと出力の関係

加速器駆動原子炉の特徴と革新性(4)

ADS中の出力分布は原子炉中の出力分布と様相を異にする

未臨界体系中の中性子束分布は中性子源から距離が離れるに従って指数関数的に減少する

出力分布は概ね中性子束分布と同様な傾向を示す

出力分布を平坦化する工夫が必要？

中性子発生位置を分散して対処？

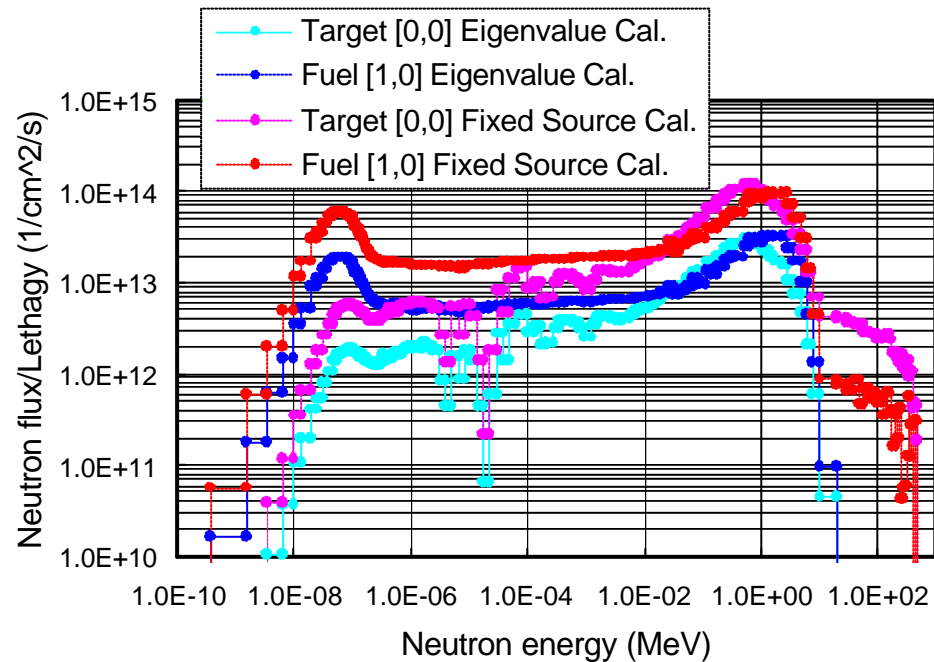
加速器中性子源で発生する中性子は概してエネルギーが高い

高エネルギー中性子に対する配慮が必要

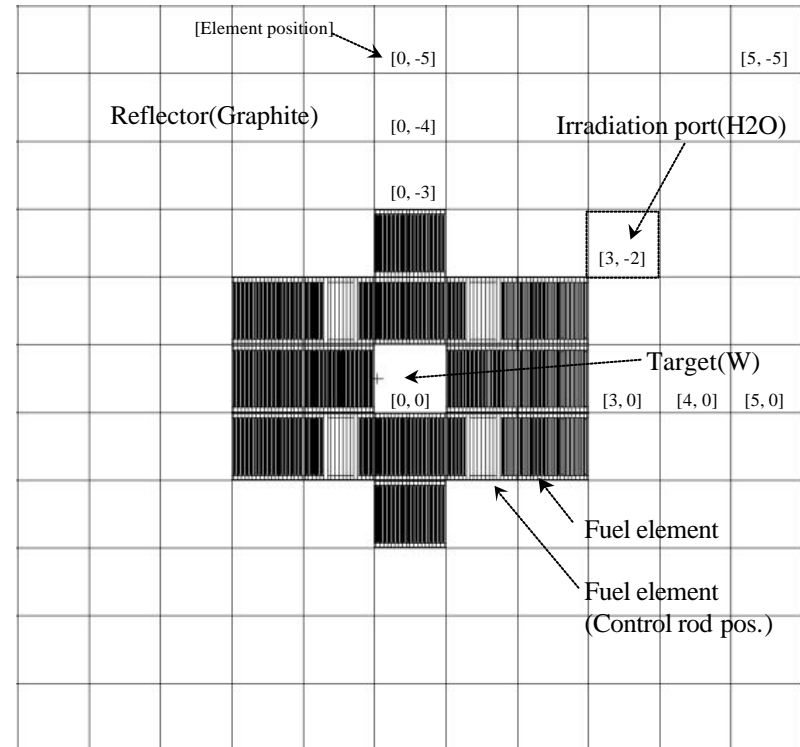
放射線遮蔽、材料照射効果に対する配慮

加速器駆動原子炉の特徴と革新性(5)

加速器駆動原子炉の中性子スペクトルは未臨界核燃料体系の中性子スペクトルが主となる

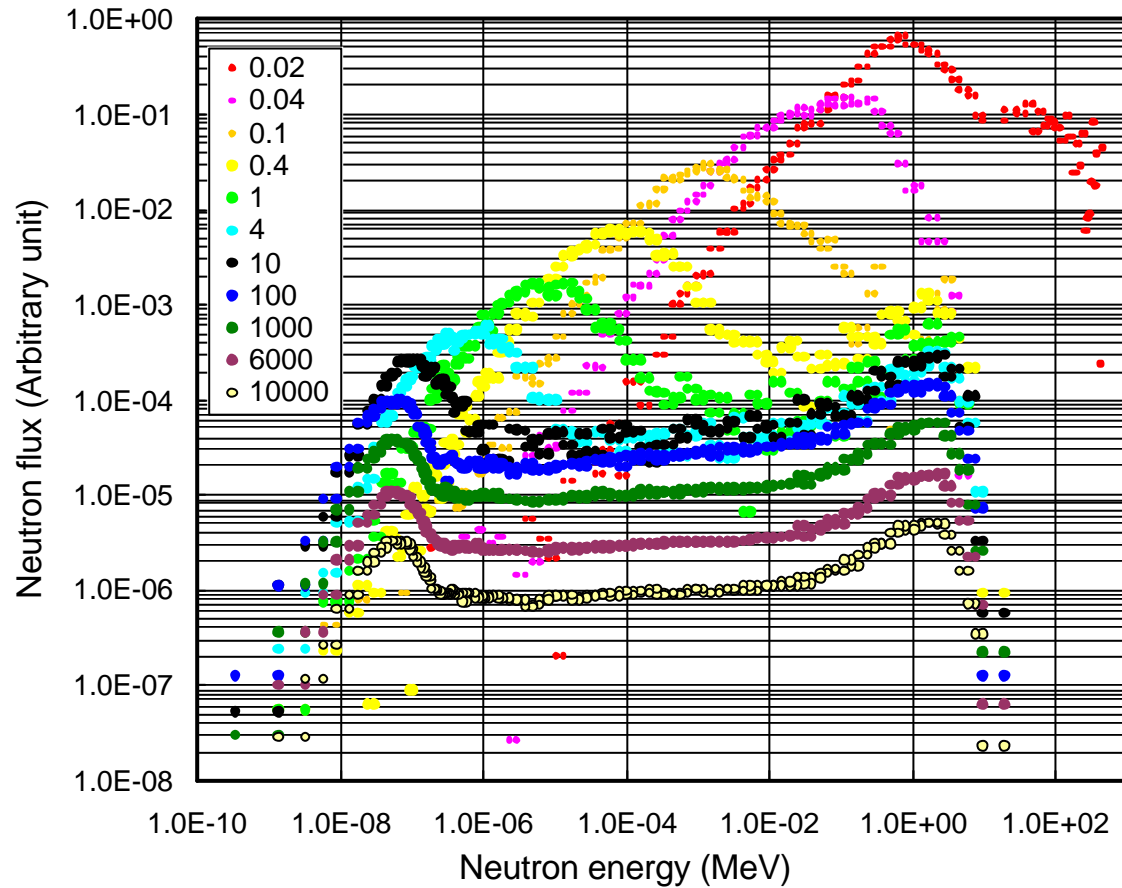


炉心中性子スペクトルの計算結果の一例



加速器駆動原子炉の特徴と革新性(6)

Fuel position [1,0], keff = 0.980, 500MeV Proton, 1mA, W target, Time unit = 1 μ s



陽子パルス入射後の炉心中中性子スペクトルの時間的变化

加速器駆動原子炉の特徴と革新性(7)

核分裂の連鎖反応に寄与しない中性子の利用

核変換処理装置・・・マイナーアクチニドなどの処理

核燃料増殖装置・・・ ^{232}Th から ^{233}U の製造など

(研究用中性子源装置)

核分裂連鎖反応に伴うエネルギーの利用

エネルギー発生装置・・・発電して余剰電力を供給

核燃料増殖を行い、核変換処理を行いつつ、エネルギーを発生する安全な原子力システム・・・ルビア博士がエネルギー増幅器として提唱した夢の装置(トリウム燃料の利用)

加速器駆動原子炉開発上の課題(1)

高エネルギーかつ大電流の安定な加速器の開発

- 原子炉システムとして利用するためには安定であることが必要不可欠

現行の加速器はしばしばビームトリップを引き起こす
ビームトリップへの対処が必要

- エネルギー発生装置としての利用には電力効率の高い加速器の開発が必要不可欠

加速器駆動原子炉で発電した電力から加速器の運転等に必要な電力を差し引いた、余剰電力が商業目的に利用可能

例えば電力効率は円型加速器 > 線型加速器

加速器駆動原子炉開発上の課題(2)

未臨界体系の炉物理は古くて新しい問題

- 臨界体系の中性子増倍は k_{eff} の値に左右されるが、未臨界体系の中性子増倍は $1/(1-k_{\text{eff}})$ の値に左右される

現行の核計算の精度ではADSの詳細設計が困難

k_{eff} ではなく、 $1/(1-k_{\text{eff}})$ の計算精度が重要

- ADS中の中性子増倍は、中性子源の位置及び中性子源で発生する中性子のスペクトルに左右される

中性子のインポートンスが重要

中性子インポートンスの評価が重要

加速器駆動原子炉開発上の課題(3)

➤ 未臨界度測定法の精度向上が必要

現在、臨界近傍での未臨界度測定法はほぼ確立している。
しかし、 $k_{\text{eff}}=0.95$ 以下では未臨界度測定の精度が悪い。

加速器駆動原子炉の運転に k_{eff} (or 未臨界度)の測定が必要不可欠？

➤ 動特性に関する知見？

ビームトリップなどへの対処が不可欠になると予想されるが、
加速器駆動原子炉の動特性に関する知見が不足

モンテカルロ計算などで遅発中性子の時間的振る舞いを考慮することが必要？

加速器駆動原子炉開発上の課題(4)

核破砕反応で発生する中性子のエネルギースペクトル、角度分布、核破砕生成物等及び高エネルギー中性子の核データに関する知見が不足

- 核破砕反応で発生する中性子のエネルギースペクトル、角度分布等及び高エネルギー中性子の核データはADSの設計に必要不可欠・・・知見(データ)が不足
- ADSでは核分裂生成物に加えて核破砕生成物が発生する・・・核破砕生成物に関する知見(データ)が不足
- 高エネルギー中性子の輸送は？・・・知見が不足
放射線遮蔽、材料照射効果等の評価に重要

加速器駆動原子炉開発上の課題(5)

除熱技術、材料技術、遮蔽技術等の開発が不可欠

- 中性子発生ターゲットで局所的に大量の熱が発生する
極限的除熱技術の開発が必要
- 中性子発生ターゲット、加速器ビーム窓周辺は大量の放射線照射を受ける
材料照射効果の研究、耐放射線材料の開発が必要
- 特に高エネルギー中性子の遮蔽に関する研究が必要
生体及び材料の放射線防護に必要不可欠

加速器駆動原子炉開発上の課題(6)

燃料技術、再処理技術、廃棄物処理技術、計測 制御技術、安全評価技術等々の開発が不可欠

燃料中で核破砕反応が起こる可能性あり

核破砕生成物の処理、環境影響評価

起動方法、出力制御方法の検討

核燃料の燃焼に伴う出力分布(出力ピーキング)の変化

加速器駆動原子炉開発の現状

加速器駆動原子炉は夢の原子力システムとなり得る可能性を秘めているが、その開発にあたって解決すべき課題を数多く抱えており、現在はフェージビリティスタディの段階にある

研究対象として学術的価値が高い？

加速器技術、中性子源技術、未臨界炉技術、除熱技術、材料技術、遮蔽技術等々の開発が必要不可欠

まずは早急に成立性評価を実験的に行うことが必要

高出力システムの安全性に関しては十分な検討が必要

・・・低出力システムによる知見の蓄積が必要

平成14年度
革新的原子力システム技術開発公募

FFAG加速器を用いた加速器駆動未臨界炉
に関する技術開発

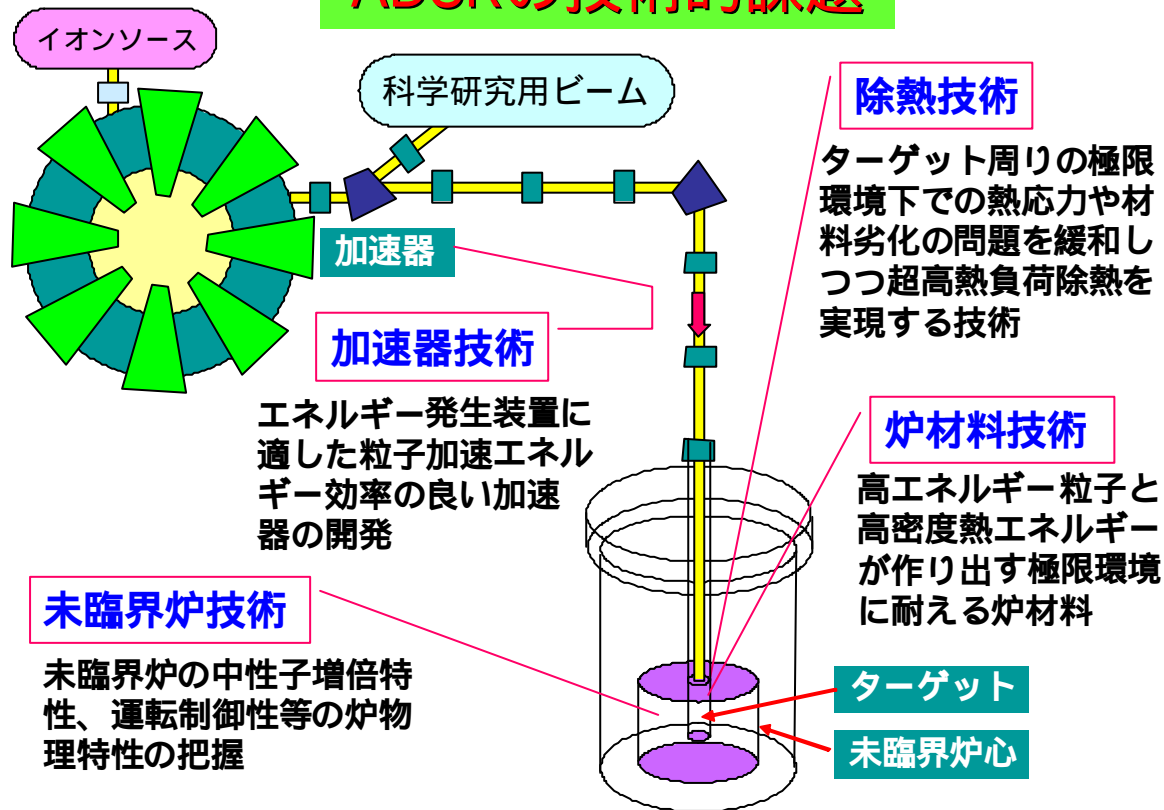
平成14年9月18日
文部科学省分館

京都大学原子炉実験所
三島嘉一郎

提案の概要

目的：革新的エネルギー発生装置としての
ADSRの成立性評価

ADSRの技術的課題



技術開発の内容

- **加速器技術**
エネルギー可変型FFAG
加速器の開発
- **未臨界炉技術**
入射エネルギー依存炉特性実験と解析
- **炉材料技術**
中性子エネルギー依存材料照射特性の研究
- **除熱技術**
ターゲットの高熱負荷時除熱特性研究

本提案のADSRの特徴

ADSRの出力 $\frac{S}{1 - k_{eff}}$

燃料の燃焼により k_{eff} が変化
・制御棒等による k_{eff} の調節
・ S の調節

S の調節

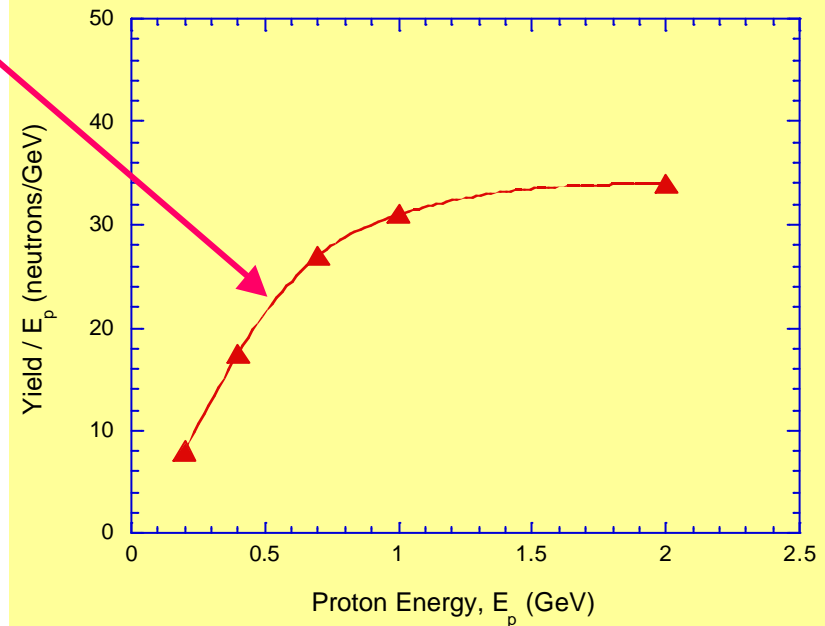
加速器ビーム電流による制御
加速粒子エネルギーによる制御

電流調整範囲が広がれば
加速器の安定性に問題

エネルギー可変型FFAG加速器

・ビーム電流と粒子エネルギーによる制御が可能

本提案では、エネルギー範囲 2.5 ~ 150MeV、電流値 ~ 7mAを狙う



陽子エネルギーと中性子発生効率との関係

FFAG加速器の研究開発状況

➤ 1953 :大河千弘による原理提案

最近まで陽子加速FFAGは実現せず

広帯域 & 高電場強度の高周波加速装置の困難

➤ 1998 :MA(Magnetic Alloy)高周波空洞の開発

科研費(基盤A):代表者 森義治

➤ 2000 :陽子加速FFAG開発

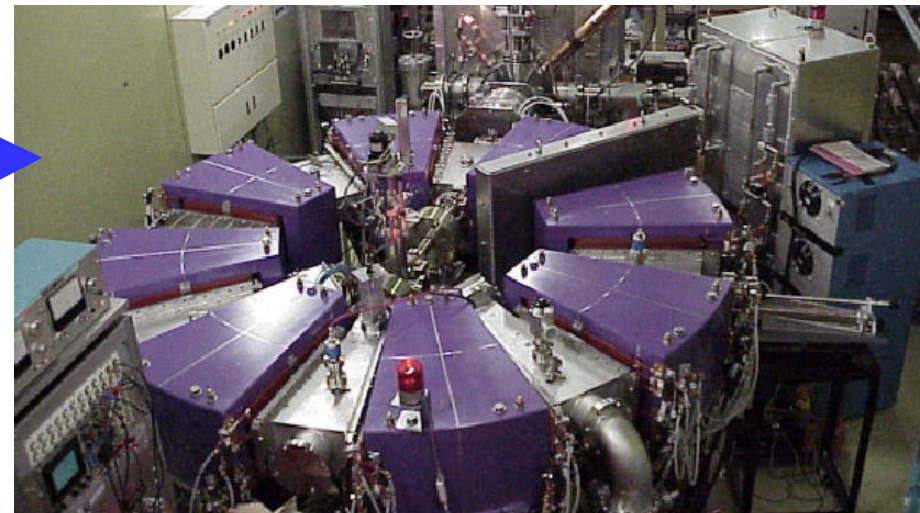
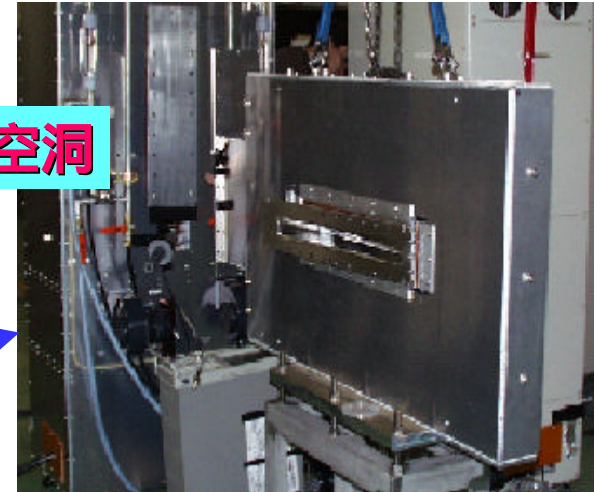
世界で初めて

科研費(基盤A):代表者 森義治

➤ 2002 :150MeV汎用型FFAG加速器の開発開始

学術創生」医学応用を主な目的

高周波加速空洞



原理実証陽子加速FFAG加速器 (PoP-FFAG)

本提案のFFAG加速器技術開発年次計画

平成 14年度

- FFAG加速器の**入射装置**購入
- エネルギー可変型FFAG加速器の**設計**
- 電磁石 (一部) **製作**

平成 15年度

- **ビーム**取出し部の**設計**
- **電磁石、真空系**の**製作**
- **電源**購入

平成 16年度

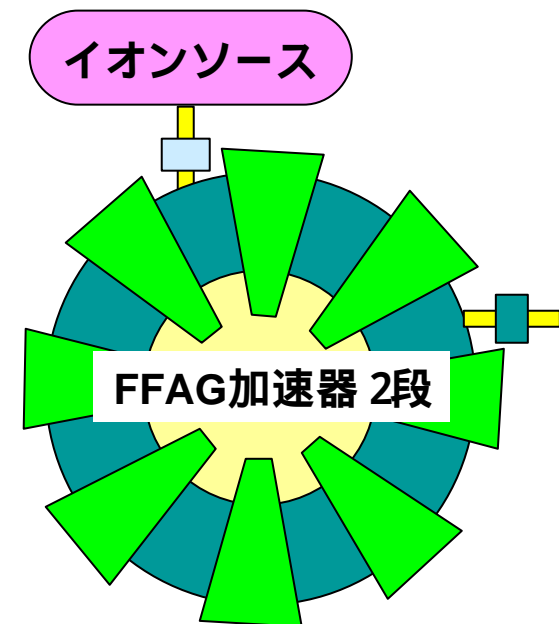
- **制御系、高周波加速部、ビーム取出し部**の**製作**
- **エネルギー可変型FFAG**完成
- **ビーム**トランスポート系の**設計、一部製作**

平成 17年度

- **ビーム**トランスポート系**完成**
- **FFAG加速器とKUCAとの結合** ... **設計 製作**

平成 18年度

- **加速効率等**の**測定**
- **エネルギー可変型FFAG加速器**の**改良**



目標 : ~ 7mA

2.5~150MeVエネルギー可変

未臨界炉技術開発

これまでの開発状況

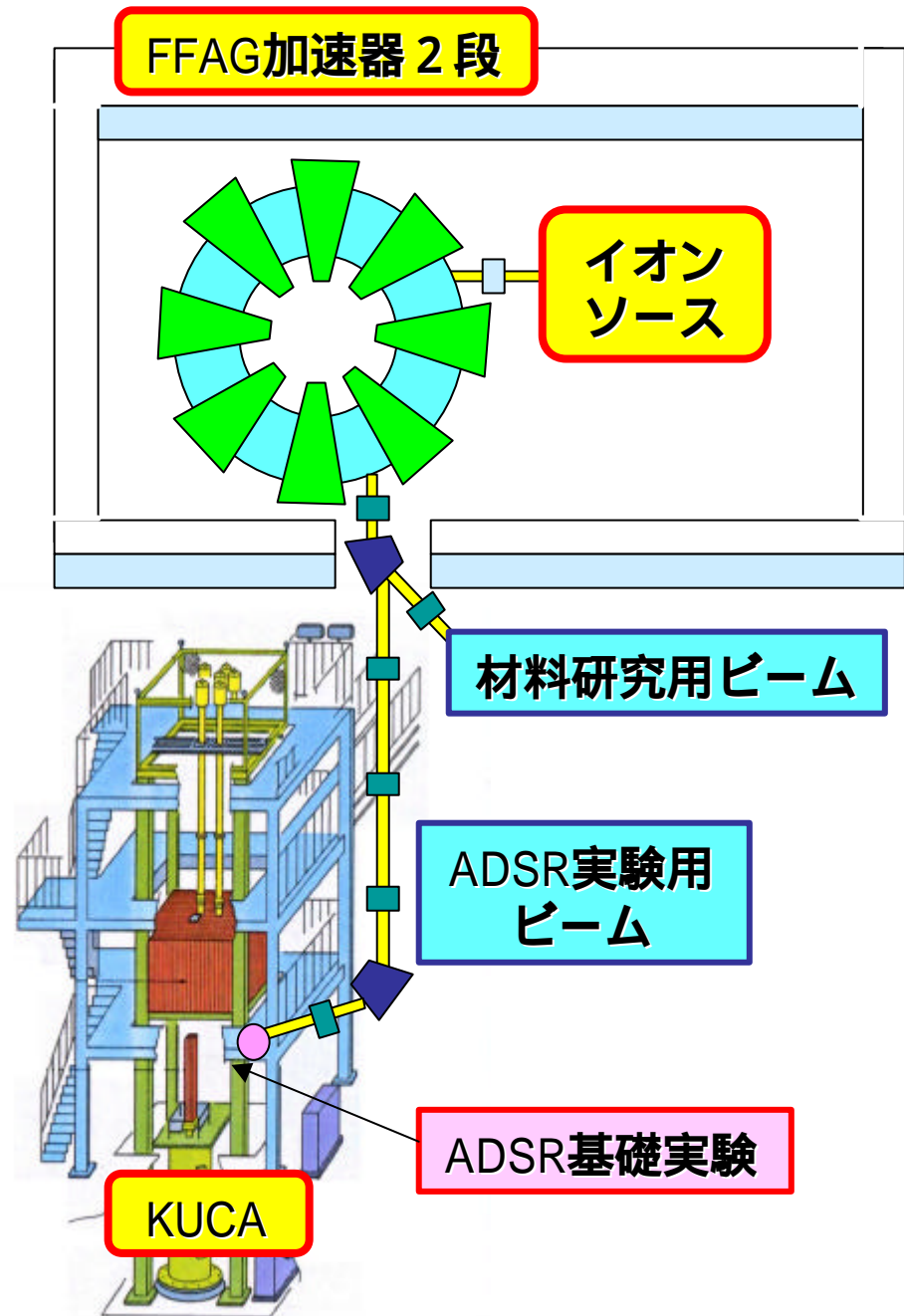
- ADSRの概念設計研究
- KUCA炉物理実験と解析

核計算の精度が極めて不十分

本提案の技術開発

- KUCAとFFAGとの結合による未臨界炉の特性研究
 - ◆ 入射中性子エネルギー依存の中性子増倍率の研究
 - ◆ 各出力調整方式の利害得失の検討
 - ・ 制御棒、ビーム電流・エネルギー

ADSR成立性の評価



未臨界炉技術開発年次計画

平成 14～ 16年度

- KUCA安全連錠 核計装系の改修、付設加速器の整備
- 未臨界炉の炉物理実験と核計算コードの検証、改良、理論的検討
 - ターゲット部 周辺部の中性子挙動の解析的研究
 - 核設計コードを用いたADSR制御性に関する検討

平成 17年度

- FFAG加速器で発生する中性子の特性測定
- KUCA核計装系の改修、FFAG加速器とKUCAとの結合

平成 18年度

- KUCA核計装系、制御棒駆動装置の改修
 - 中性子エネルギー依存核特性実験
 - 核破砕を含む核計算コードの精度評価

ADSR成立性の評価

技術開発計画のまとめ

- **FFAG加速器を用いたADSRの提案**
FFAG加速器、未臨界炉技術、炉材料技術、除熱技術
- **エネルギー発生装置としてのADSRの成立性評価、技術基盤の整備（5ヶ年計画）**
資源の有効利用、環境負荷低減、核拡散抵抗性の向上、核燃料サイクルの柔軟性の向上に寄与
新型中性子源への応用、粒子線利用科学研究への貢献
- **充実した研究開発の実施体制 計画**
- **広範な他の技術分野への波及効果**
核設計技術、核融合炉、科学研究、医療応用等

研究チーム

- 京都大学原子炉実験所
- 高エネルギー加速器研究機構
- 大阪大学
- 北海道大学
- 神戸大学
- 三菱電機
- 日立製作所
- 東芝
- 原子燃料工業

予算

12.5億円 / 5年

+

平成14年度補正予算

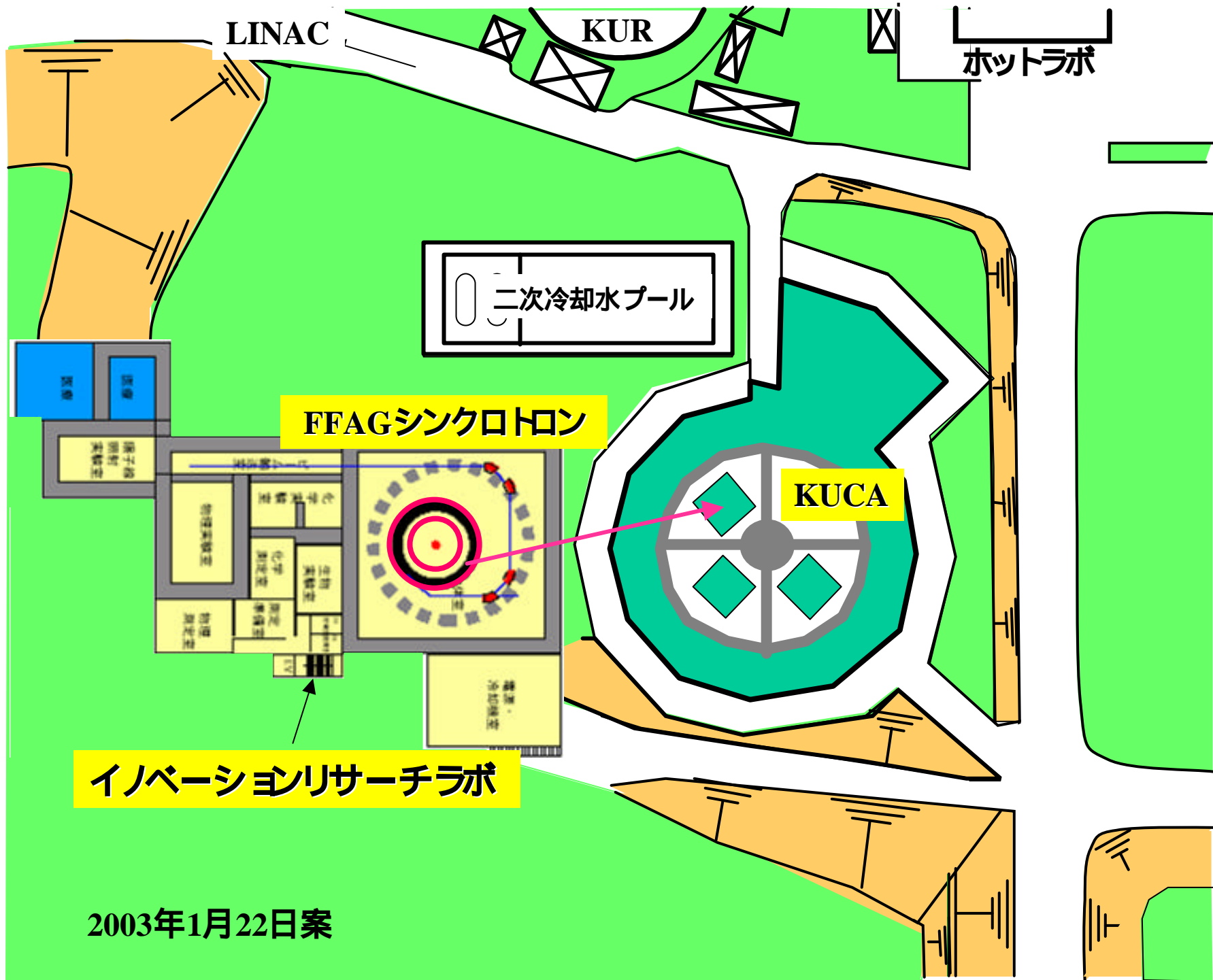
建物 14～15億円

(イノベーションリサーチラボ)

平成15年度概算要求

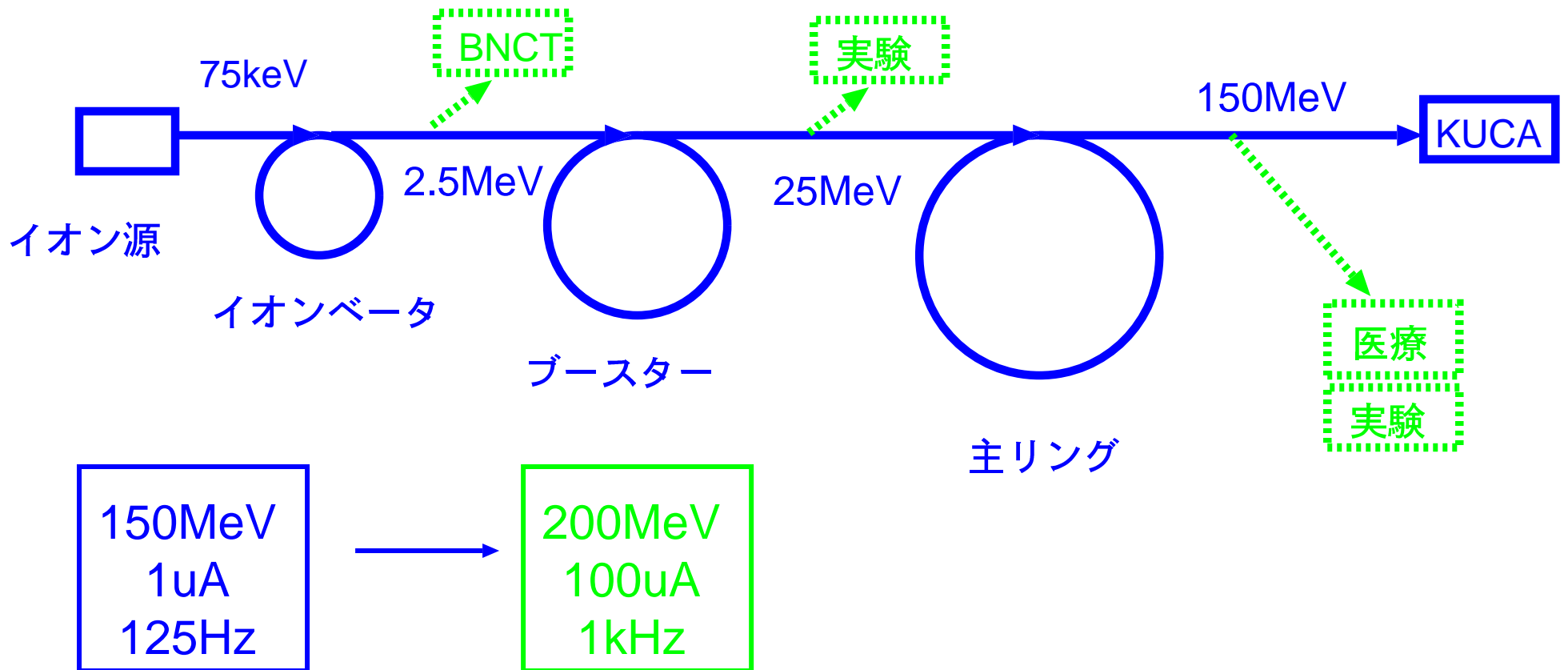
KUCA付設加速器の
整備 (イオン源等)

6～7千万円



2003年1月22日案

FFAG加速器システムパラメター

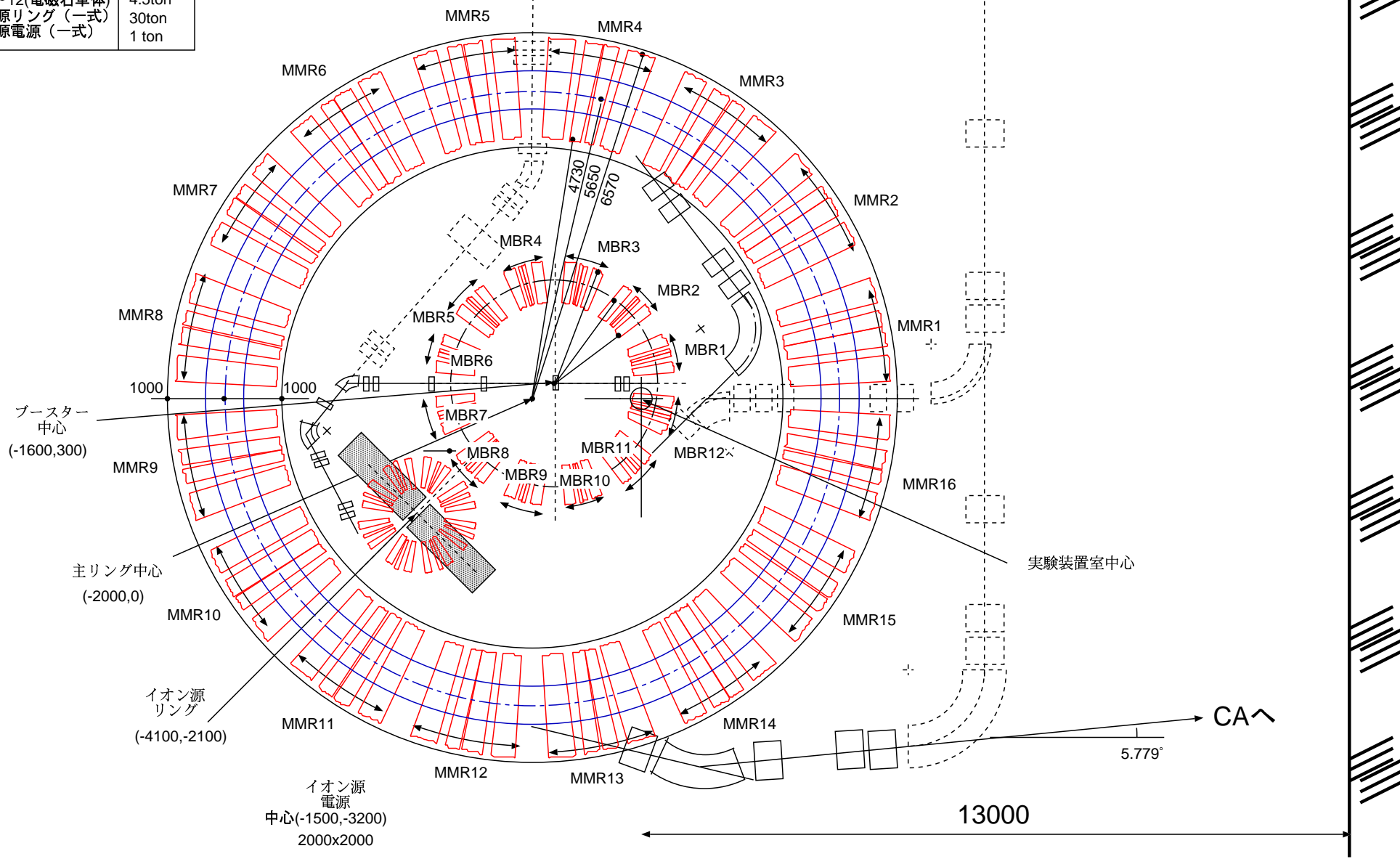


FFAG加速器システムパラメータ(続き)

	イオンベータ	ブースター	主リング
セル数	8	12	16
k	3.5	6	14
入射エネルギー	75keV	2.5MeV	25MeV
取出しエネルギー	2.5MeV	25MeV	150(200)MeV
P_ext / P_inj	5.78	3.18	2.53
入射軌道半径	0.68m	1.70m	5.4m
取出し軌道半径	1.05m	2.00m	5.8m

全体レイアウト

	重量
MMR1~16(電磁石単体)	15ton
MBR1~12(電磁石単体)	4.5ton
イオン源リング(一式)	30ton
イオン源電源(一式)	1 ton



ADSR開発ロードマップ

ADS実用発電炉

ADS核変換処理炉

ADS実証炉

科学研究

ADS研究炉

ADS原型炉

10年後

15年後

加速器技術開発

未臨界炉技術開発

炉材料技術開発

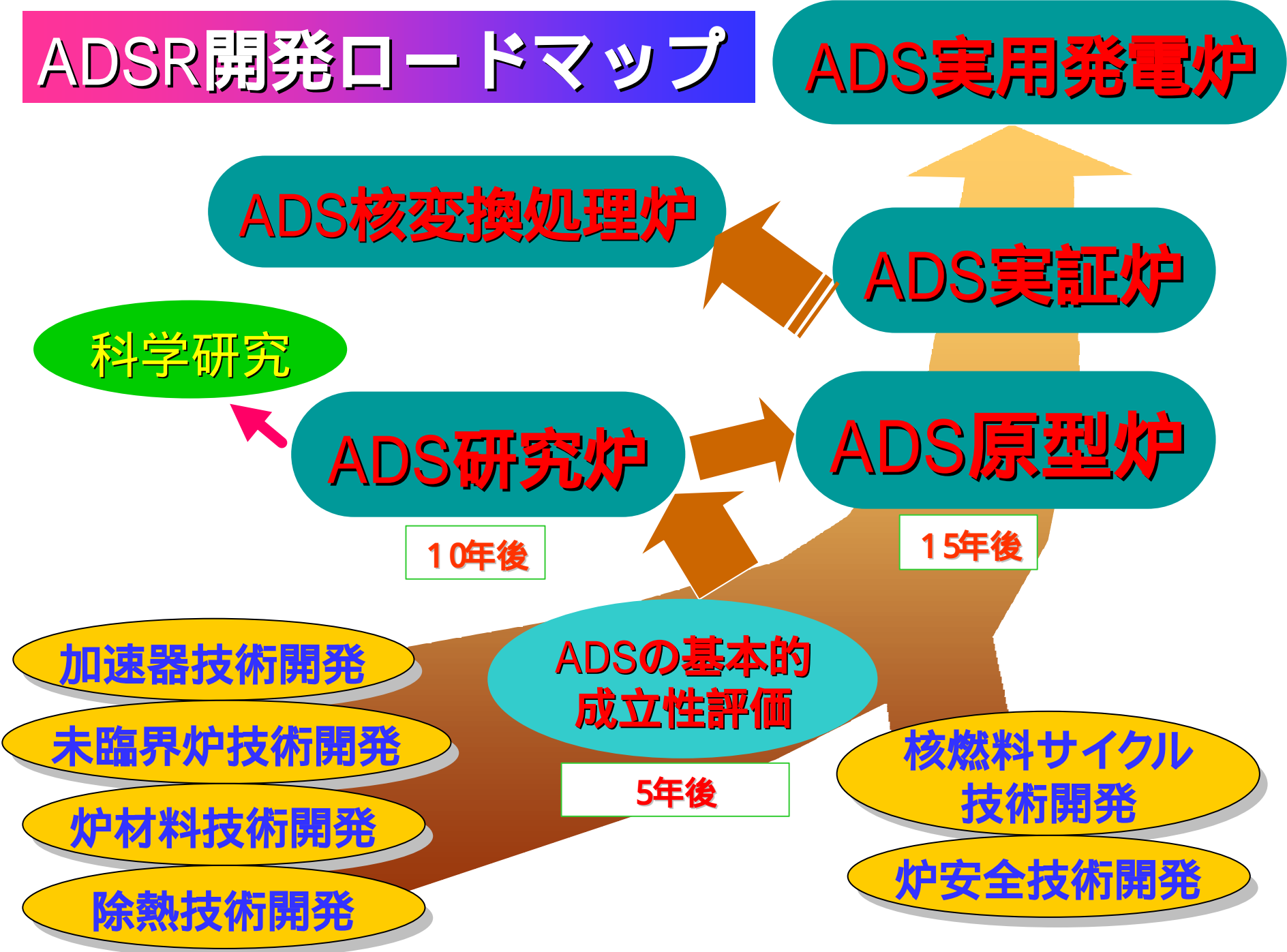
除熱技術開発

ADSの基本的
成立性評価

5年後

核燃料サイクル
技術開発

炉安全技術開発



ADSR実用化のための開発目標

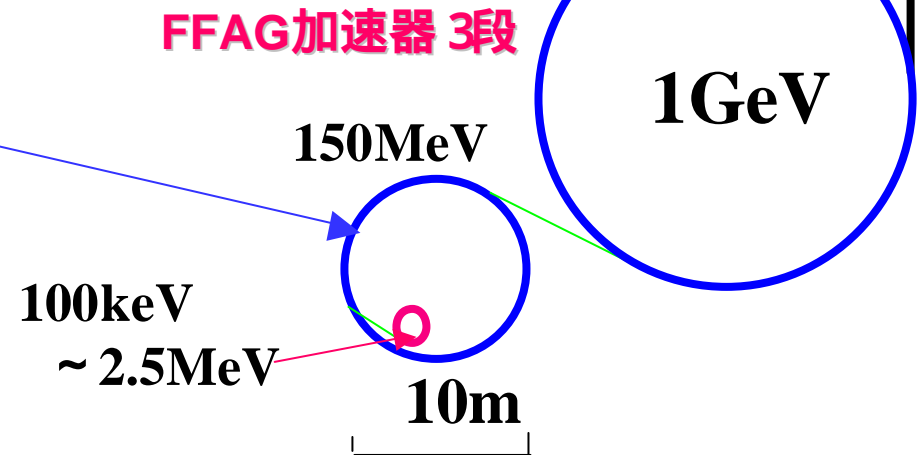
1GeV-1MW FFAG陽子加速器

Energy	150MeV-1GeV
Intensity	6×10^{11} ppp
Rep. Rate	10kHz (1kHz x10)
Ave. Current	1mA (Beam Power 1MW)
Radius	~16m
k	25
# of cell	48
rf freq.	5.43MHz - 8.08MHz
rf voltage	~850kV
bunch width	~40ns

開発中の150MeV FFAG仕様

150MeV FFAG main parameters

No. of sectors	12
Field index(k-value)	7.5
Energy	12MeV - 150MeV
Repetition rate	250Hz
Max. Magnetic field	
Focus-mag.:	1.63 Tesla
Defocus-mag.:	0.13 Tesla
Closed orbit radius	4.4m - 5.3m
Betatron tune	
Horizontal :	3.8
Vertical :	2.2
rf frequency	1.5 - 4.6MHz



くまとりサイエンスパーク構想図

アトムサイエンスコンソーシアム

