

# 陽子加速器の発展と展望

高エネルギー加速器研究機構

木村嘉孝

2006年5月19日

# 1. 陽子加速器の発展

## “究極の物質構造と宇宙創生の謎に迫る”

### 粒子エネルギーの単位 : eV (電子ボルト)

1 eV : 単位電荷の粒子が1V加速された時に  
得る運動エネルギー

keV :  $10^3$  eV (千電子ボルト)

MeV :  $10^6$  eV (百万電子ボルト)

GeV :  $10^9$  eV (十億電子ボルト)

TeV :  $10^{12}$  eV (兆電子ボルト)

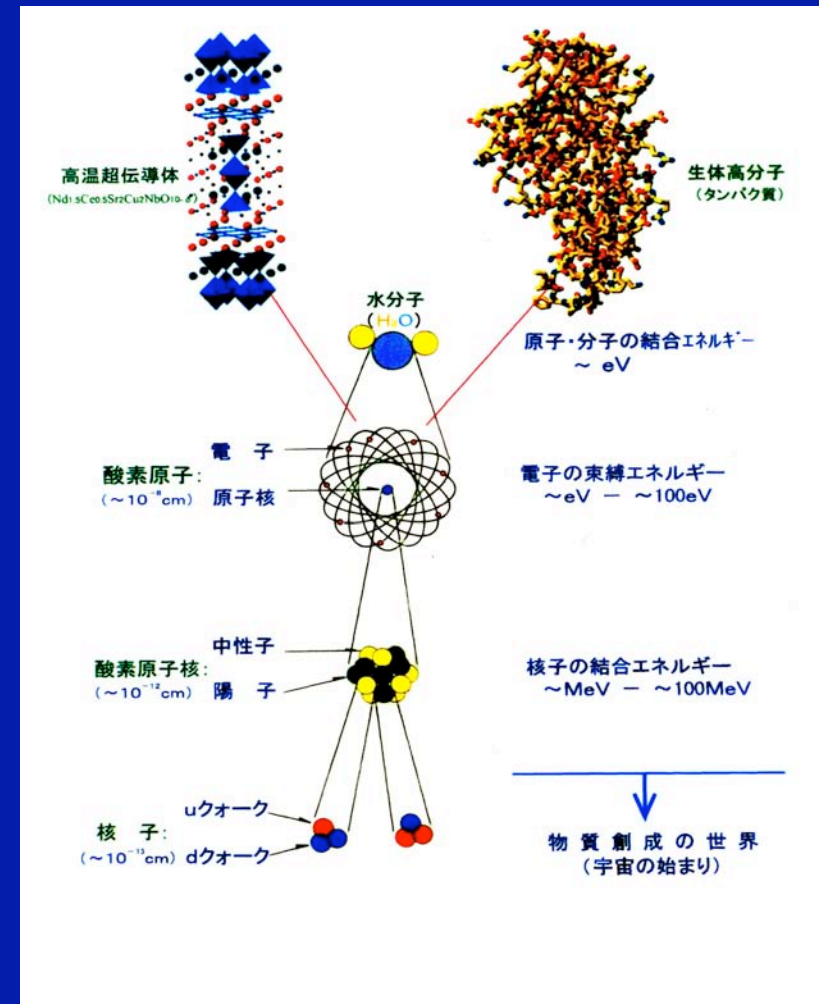
### 粒子のエネルギーと波長

粒子の波長 =  $h$  (プランク定数) / 粒子の運動量  
電子

1eV :  $\sim 1 \times 10^{-7}$  cm    1GeV :  $\sim 1 \times 10^{-13}$  cm

陽子、中性子

1eV :  $\sim 3 \times 10^{-9}$  cm    1GeV :  $\sim 0.7 \times 10^{-13}$  cm



# “いろいろな加速器の到達ビームエネルギー”

## 代表的な陽子加速器

◇コッククロフト・ウォルトン型静電加速器(1932)

開放型: 約1MeV

加圧型: 約4MeV

◇陽子リニアック(線形加速器)

ドリフト・チューブ型: 200MeV

サイドカップル空洞型: 800MeV

超伝導空洞型: 1GeV

◇サイクロトロン(1931)

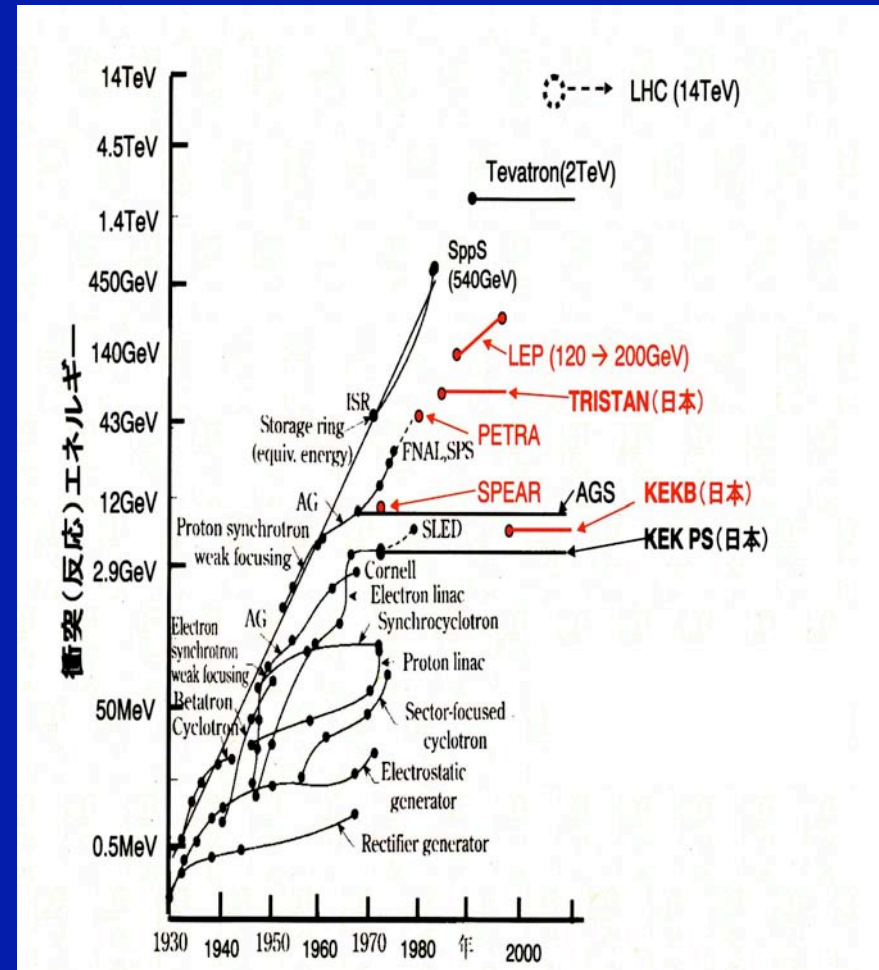
原型: 約20MeV

AVF型など: 約600MeV

◇シンクロトロン(1945)

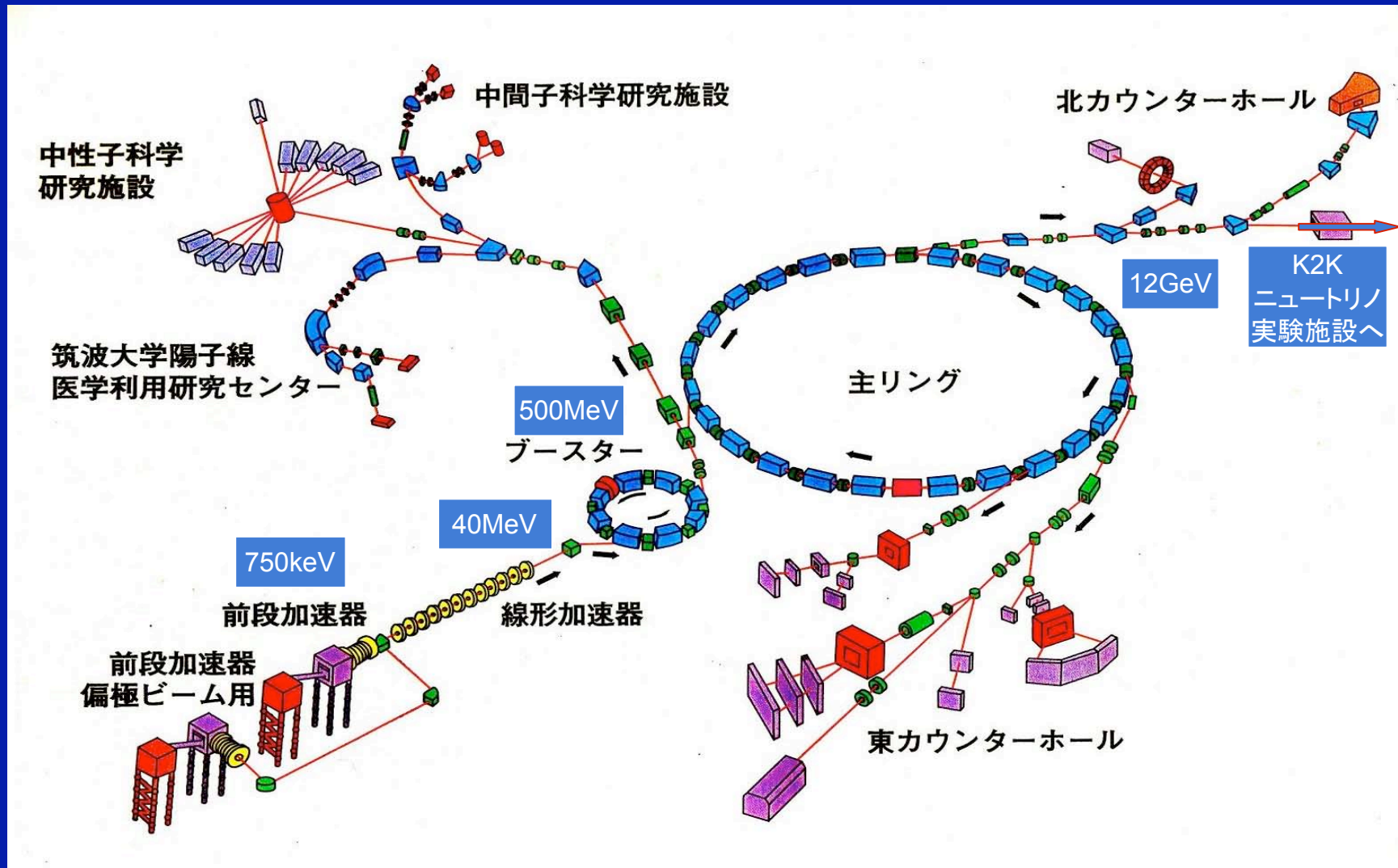
常伝導マグネット型: 500GeV

超伝導マグネット型: 1TeV → 7TeV



# “KEK 12 GeV 陽子シンクロトロン”

前段加速器	線形加速器	ブースタ	主リング
0 → 750 KeV	750keV → 40MeV	40MeV → 500MeV	500MeV → 12GeV

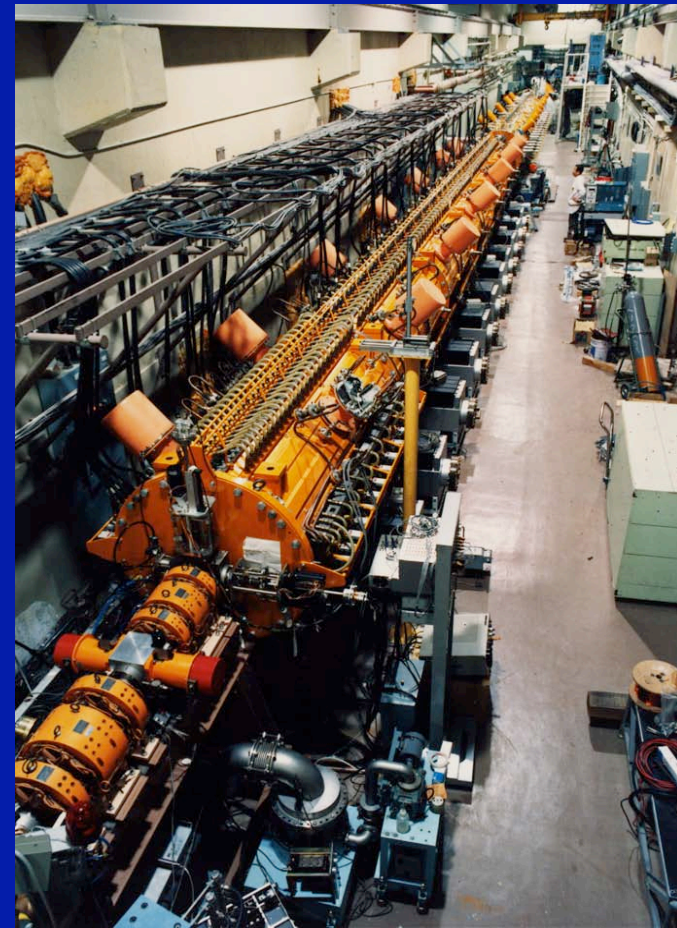




前段加速器: 0 → 750keV  
イオン源+コッククロフト・ウォルトン型  
ピーク電流(H): 20mA



線形加速器: 750keV → 40 MeV  
ドリフトチューブ型リニアック  
ピーク電流(H): 18mA



ブースター: 40MeV → 500MeV

機能結合型シンクロトロン

繰り返し: 20Hz

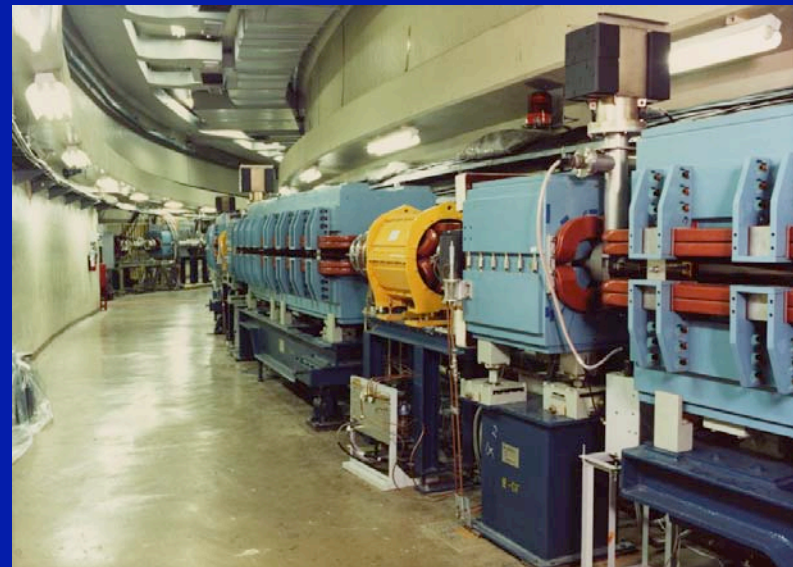
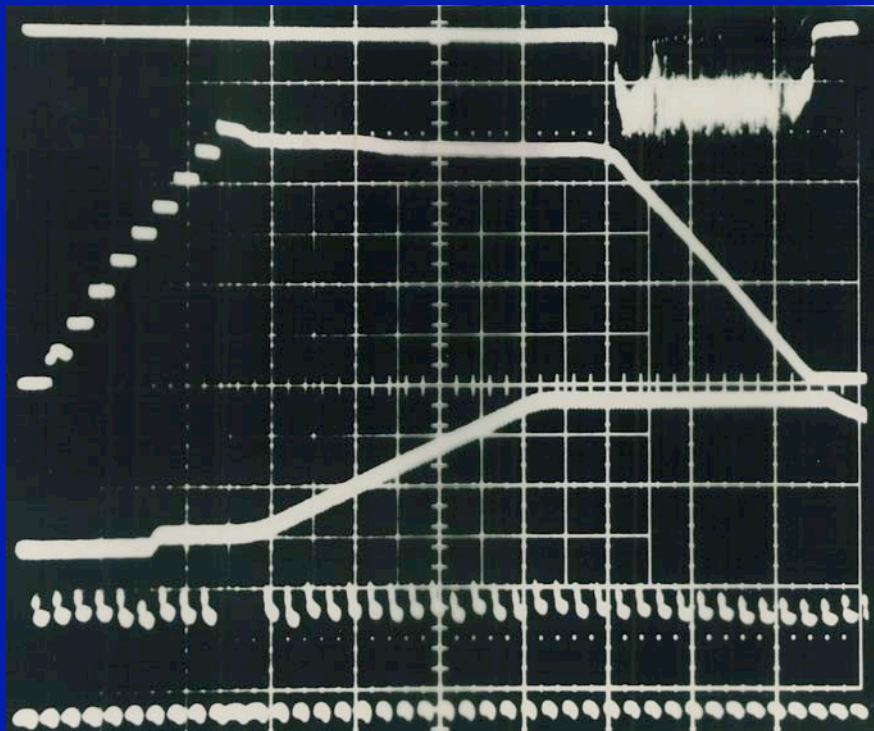
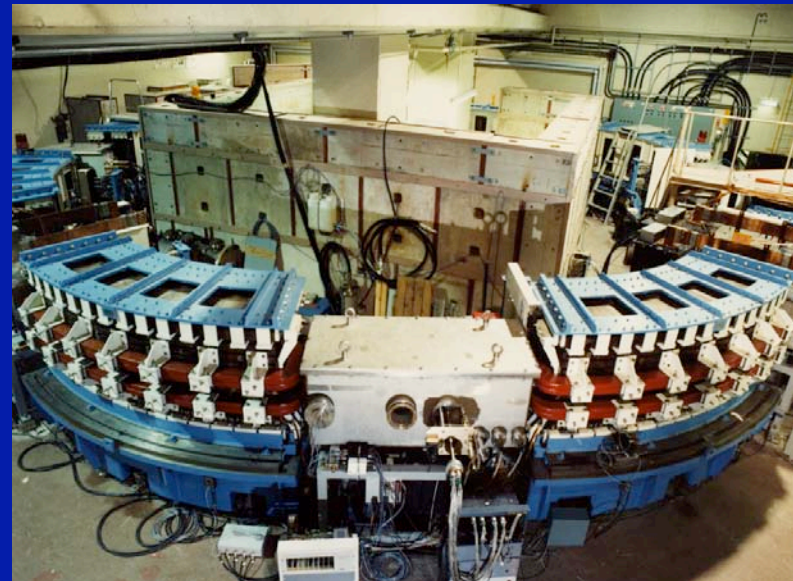
平均ビーム電流: 6 $\mu$ A

主リング: 500MeV → 12GeV

機能分離型シンクロトロン

繰り返し: 0.5Hz

平均ビーム電流: 0.6  $\mu$ A





# “KEK 12 GeV 陽子シンクロトロン - まとめ”

建設: 1971~1975

実験: 1976~2005

建設費: 約80億円

日本で最初の高エネルギー陽子加速器施設

世界でも最も早く採用された新しい加速器の方式

中間にブースターを入れるカスケード方式

機能分離(偏向作用と集束作用)磁石リング

ブースターを利用した新しい応用研究の展開

中性子実験施設

ミュオン実験施設

医学利用施設



12GeV 陽子シンクロトロン 施設全景

## 2. 陽子加速器の展開(1) “ビームエネルギーの限界に挑む”

### ビームエネルギーの限界

加速器の巨大化

建設並びに維持コストの増大

「1994年に建設中止に追い込まれたアメリカのSSC加速器  
(20TeV+20TeVの陽子・陽子衝突リング)は周長約80km、  
建設コスト約1兆円という巨大計画であった」

### 超伝導マグネット技術の応用

一様磁場B中の運動量pの陽子ビームの軌道半径R

$$R \text{ (m)} = 3.3 \times p \text{ (GeV/c)} / B \text{ (T)}$$

鉄心マグネットの最高磁場:約2T    超伝導マグネットの最高磁場:約8~10T

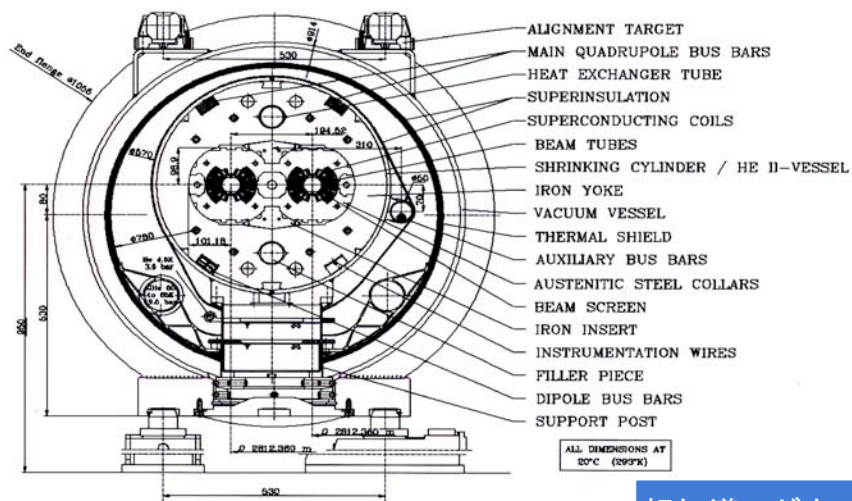
### レーザーとプラズマを利用した新しい加速方法の開発(将来技術)

1 GeV / m    ?

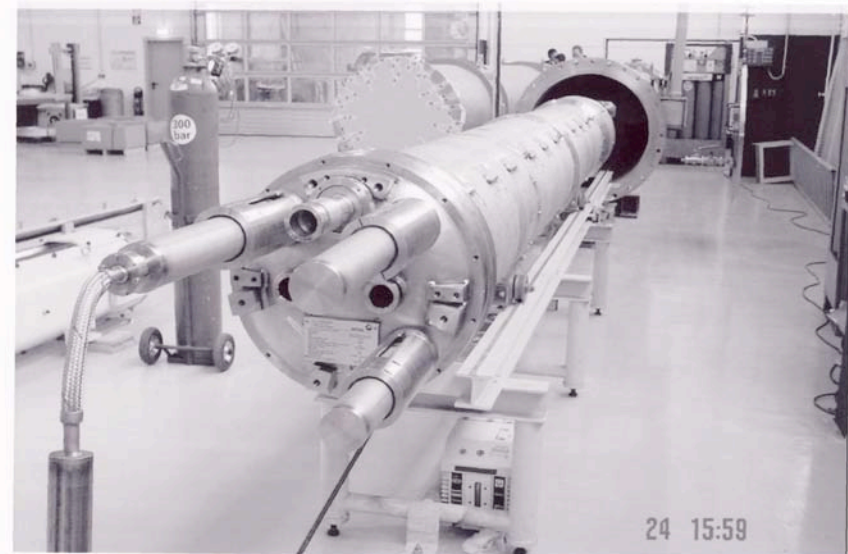


# CERN-LHC 陽子・陽子ビーム衝突リング

ビームエネルギー: 7 TeV 偏向磁場: 8T リング周長: 27km



超伝導マグネット



## 2. 陽子加速器の展開(2) “ビーム強度の限界に挑む”

### ビーム不安定性

ビーム中の粒子同士が電氣的に作用しあって起こす現象

- 出来るだけ短時間にビームを光の速さに近づける(線形加速器)
- ビームを太くして電荷の密度を小さくする

ビームが真空ダクトなど軌道を取り巻く構造と電磁氣的に作用しあって起こす現象

- ビームを取り巻く構造に出来るだけ凸凹を作らない

### 損失ビームによる放射線発生の問題

外部への放射線漏洩

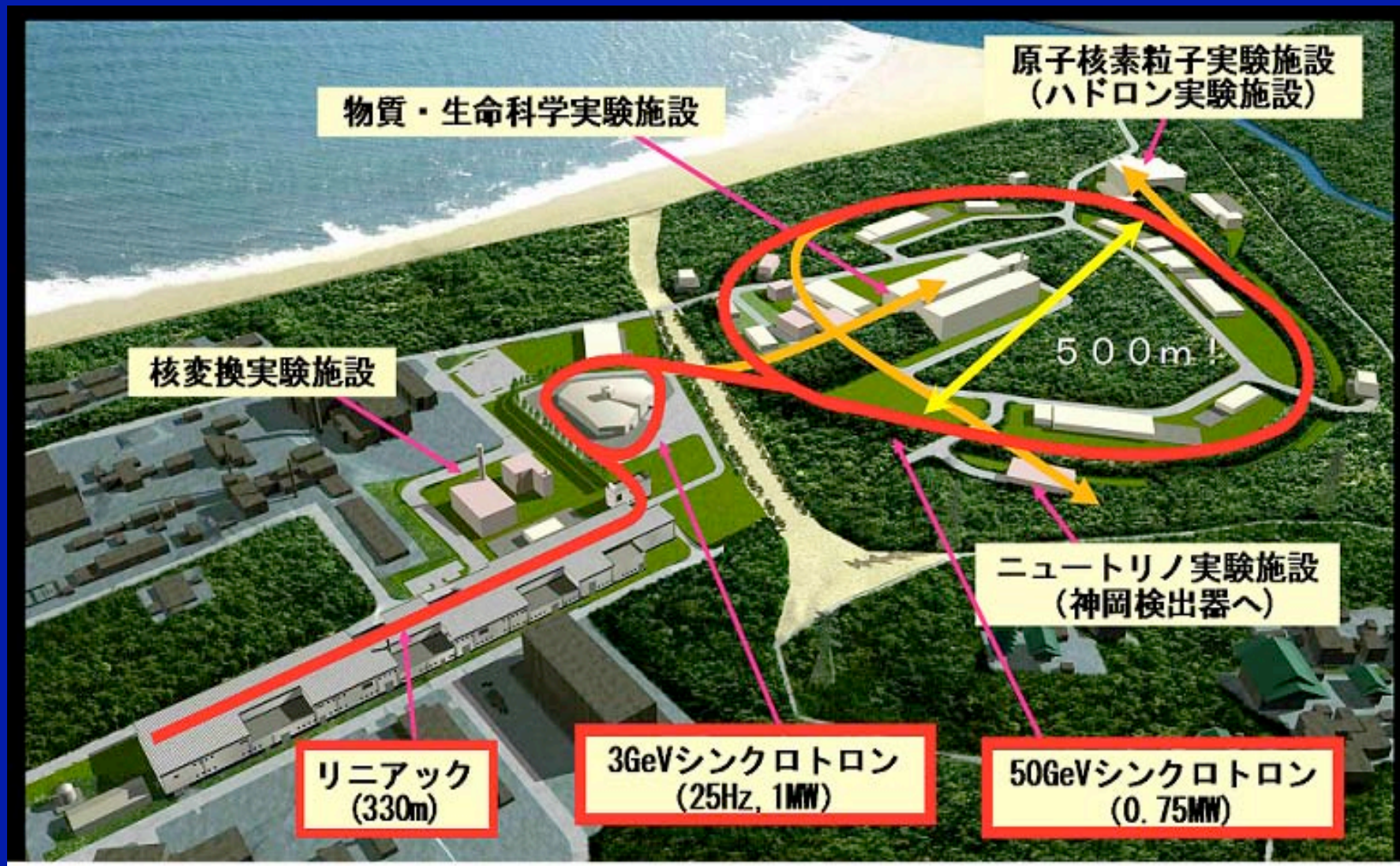
- 加速器の遮蔽

加速器装置の放射化

- 損失場所を局在化する
- 故障しない装置をつくる、故障した時交換を容易にする



# J-PARC の挑戦



J-PARC : Japan Proton Accelerator Complex



# 12 GeV PS vs. J-PARC

## 陽子リニアック

40 MeV	x 10 (5)	400 (200) MeV
40 m	x 8.3	330 m
20 Hz	x 2.5 (1.25)	50 (25) Hz
18 mA x 40μsec	x 34.7	50 mA x 500μsec

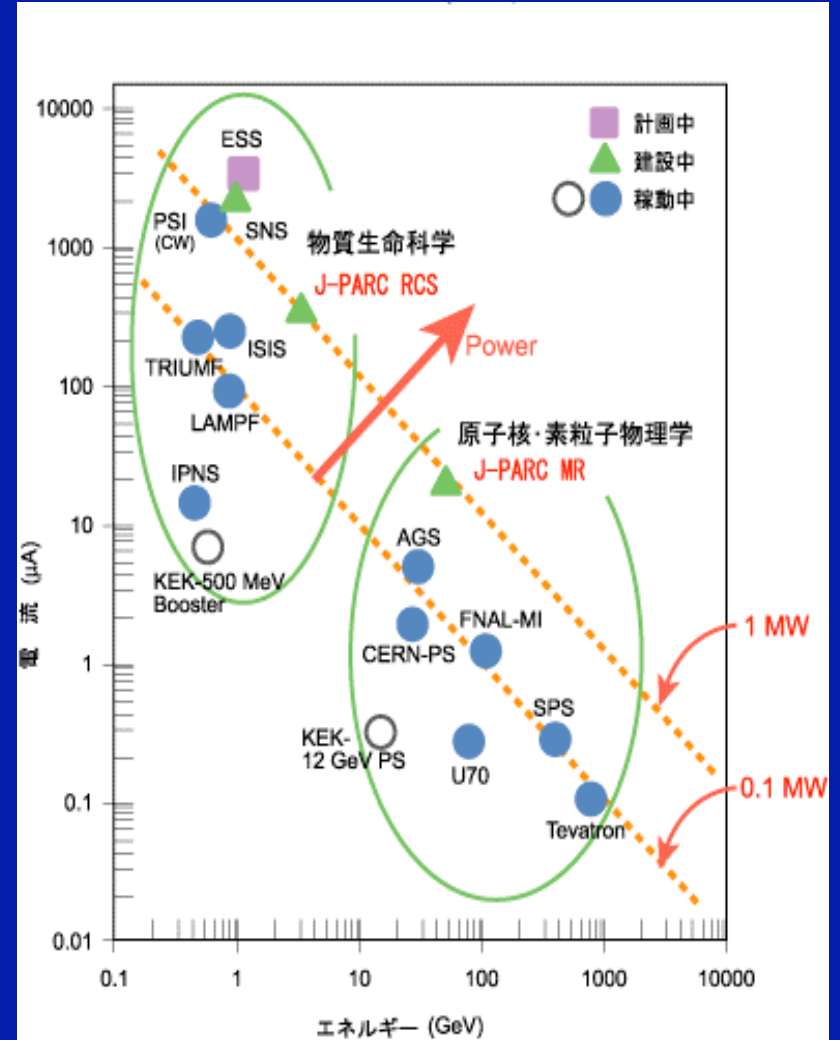
## ブースター/RCS

500 MeV	x 6	3 GeV
38 m (周長)	x 9.1	348 m
20 Hz	x 1.25	25 Hz
6 μA (平均電流)	x 56 (33)	333 (200) μA

(RCS : Rapid Cycling Synchrotron)

## 主リング

12 GeV	x 4.1 (3.3)	50 (40) GeV
340 m (周長)	x 4.6	1567 m
0.5 Hz	x 0.6	0.3 Hz
0.6 μA	x 25	15 μA



# 目標に向けて

## ◇ 加速器設計

リニアック: 各エネルギー範囲で最も適切な加速構造を開発  
(イオン源+RFQ+DTL+SDTL+SCC)

RCS: 大口径リング

主リング: 遷移エネルギーを持たないビーム光学系の採用

## ◇ 開発要素の大きな加速器装置

高周波空洞: 周波数同調用に空洞に装荷する磁性材料として、従来のフェライトに代わる新しい金属合金(ファインメット)を開発し、従来の3~4倍の加速電場を実現

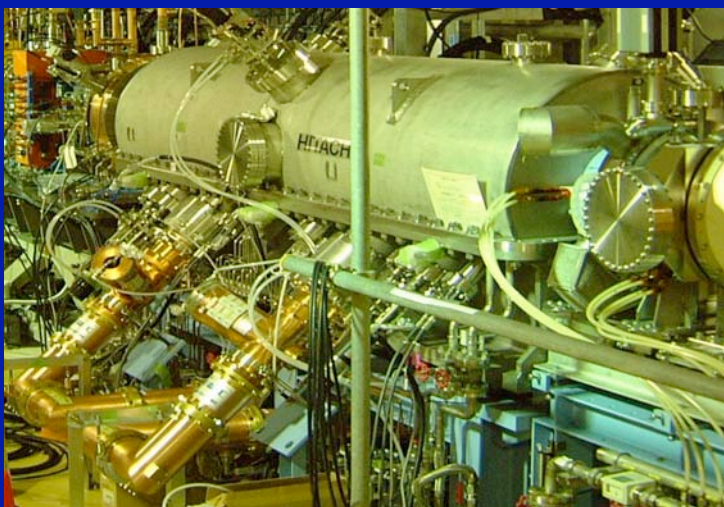
RCSの真空システム: 大口径のセラミック・ビームダクトを開発

## ◇ 大強度に向けたビーム開発

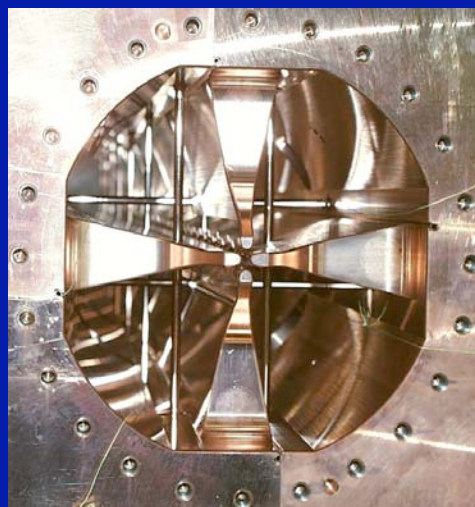
ビーム損失を1%以下に抑える新しいビーム制御手法の開発  
(加速ビームと損失ビームの精密観測、ビーム軌道・運動条件の精密制御など)

# 新しく開発された加速器装置の例

RFQ (50keV~3MeV)



RFQ の電極構造



RCS セラミック・ダクト



RCS 用加速空洞



ファインメット・コア(素材はテープ状)

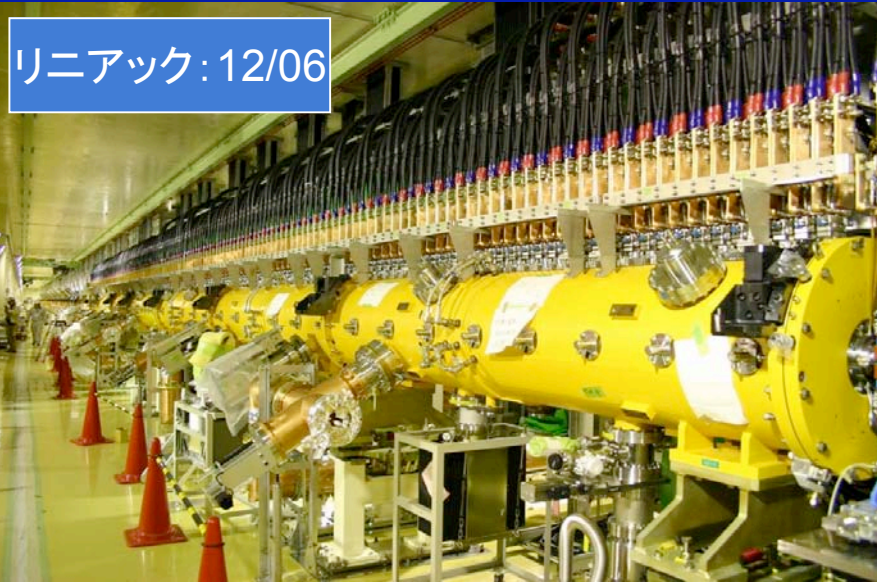


# J-PARC 施設全景





# J-PARC 加速器の建設状況



リニアック: 12/06



RCS: 10/07



主リング: 05/08