

J-Lunch 第5回

ニュートリノ

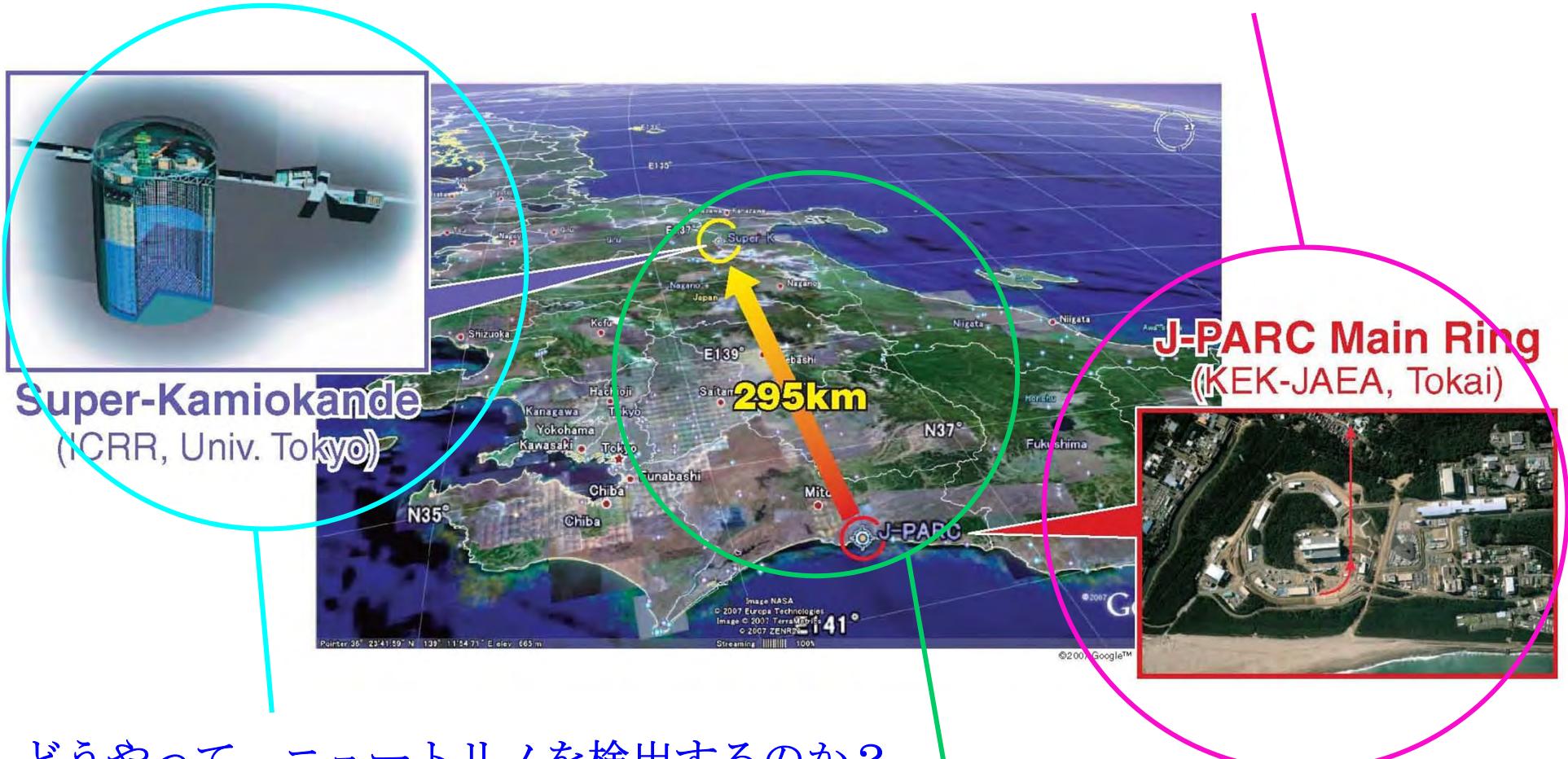
どうやってニュートリノ
をつくり出すか

2017年1月11日

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所
J-PARCセンター ニュートリノセクション
多田 将

素粒子物理学の世界によこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ！

どうやって、ニュートリノをつくり出すのか？



どうやって、ニュートリノを検出するのか？

この間に、何が起こっているのか？

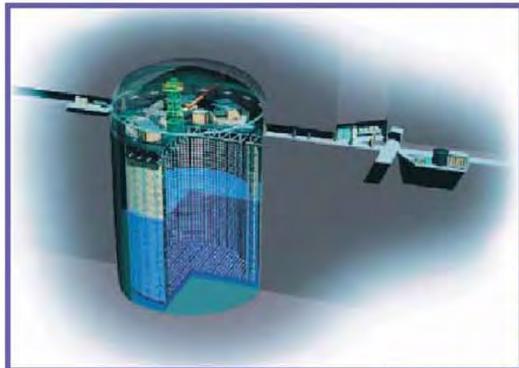
素粒子物理学の世界によこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ！



どうやって、ニュートリノを検出するのか？

素粒子物理学の世界によこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ！

どうやって、ニュートリノをつくり出すのか？



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



J-Lunch 第5回

ニュートリノ

どうやってニュートリノ
をつくり出すか

2017年1月11日

高エネルギー^{加速器}研究機構 素粒子原子核研究所
J-PARCセンター ニュートリノセクション
多田 将

加速器とは
粒子を加速する装置

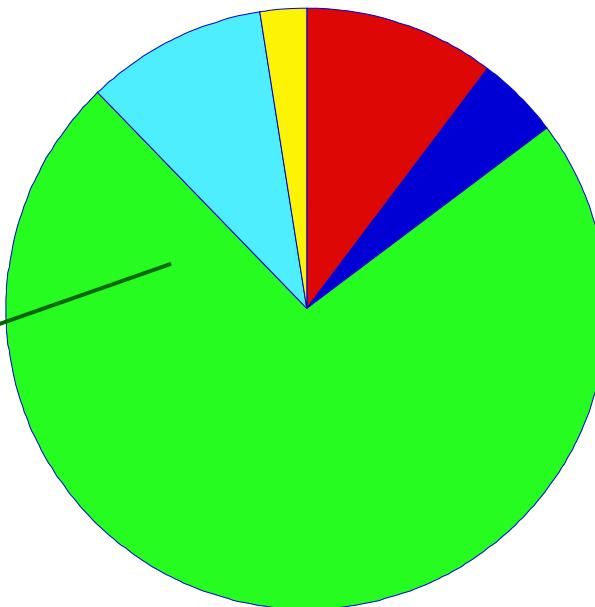
加速器とは
粒子を加速する装置

日本の加速器：1476台（2010年）

加速器とは

粒子を加速する装置

日本の加速器： **1476** 台（2010年）



医療機関

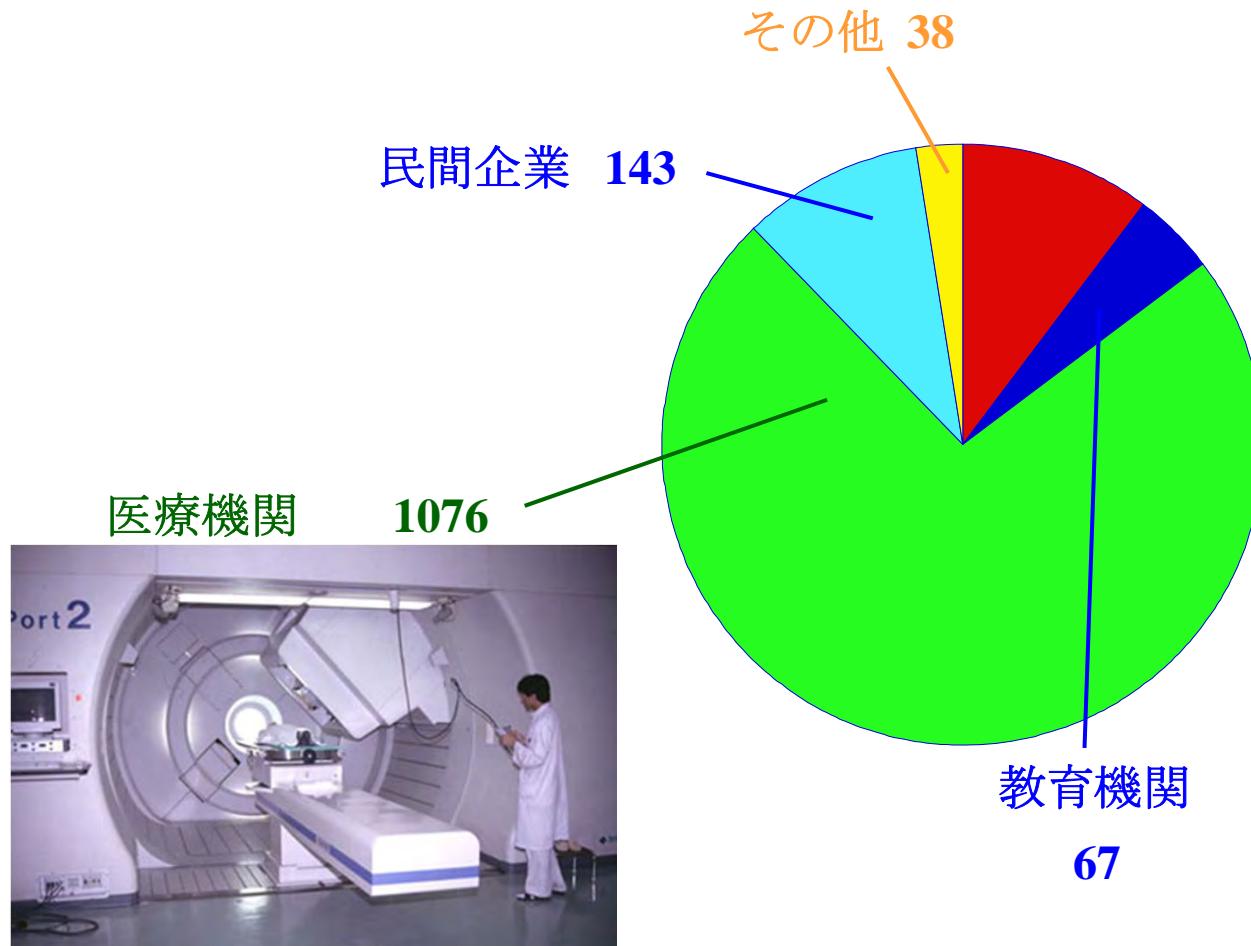
1076



加速器とは

粒子を加速する装置

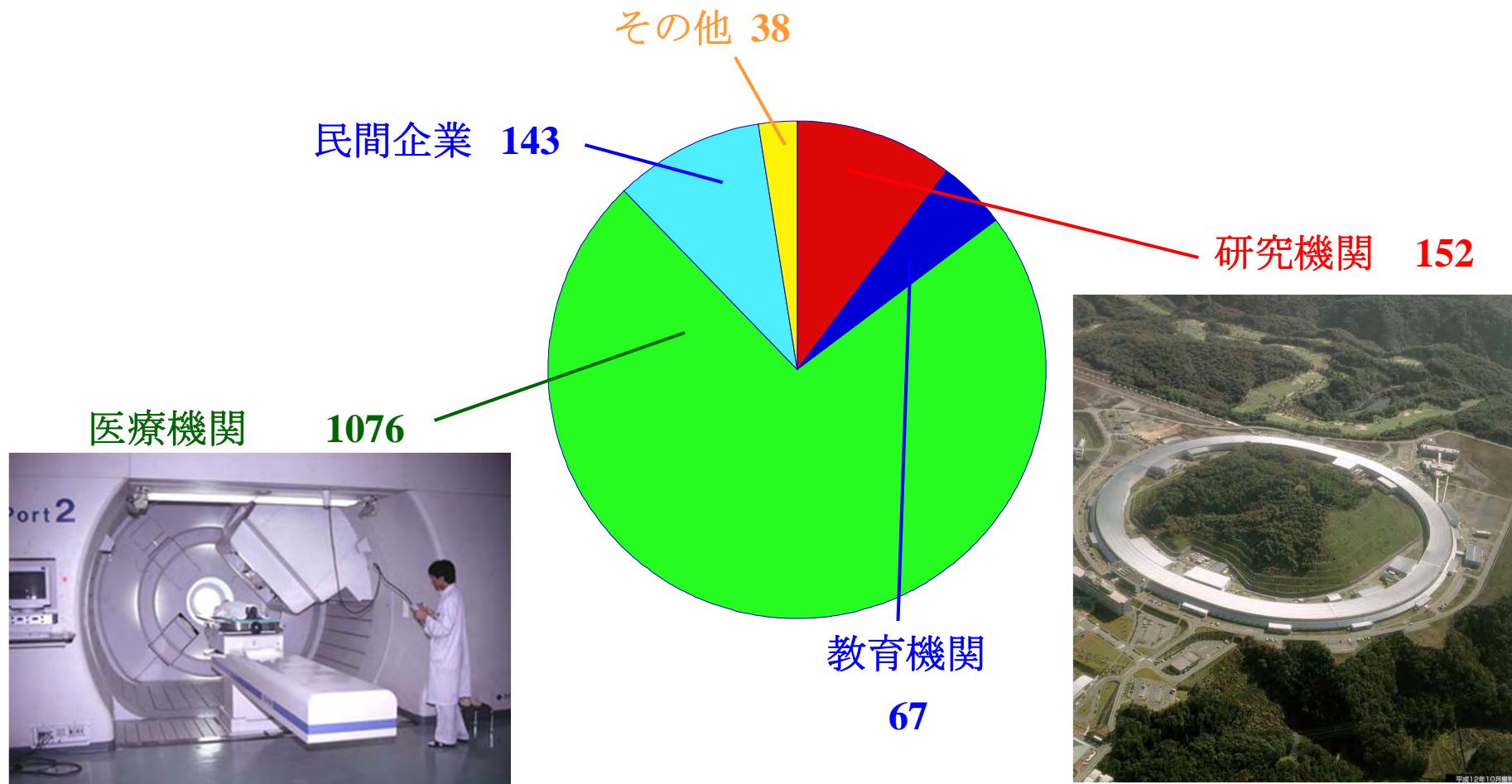
日本の加速器：1476台（2010年）



加速器とは

粒子を加速する装置

日本の加速器：1476台（2010年）



素粒子物理学の研究に用いられる加速器

KEKB



素粒子物理学の研究に用いられる加速器

KEKB



LHC



素粒子物理学の研究に用いられる加速器

KEKB



Tevatron



LHC



SLAC



素粒子物理学の研究に用いられる加速器

KEKB



Tevatron



J-PARC



LHC



SLAC



素粒子物理学の研究に用いられる加速器

KEKB



Tevatron



J-PARC



LHC



SLAC

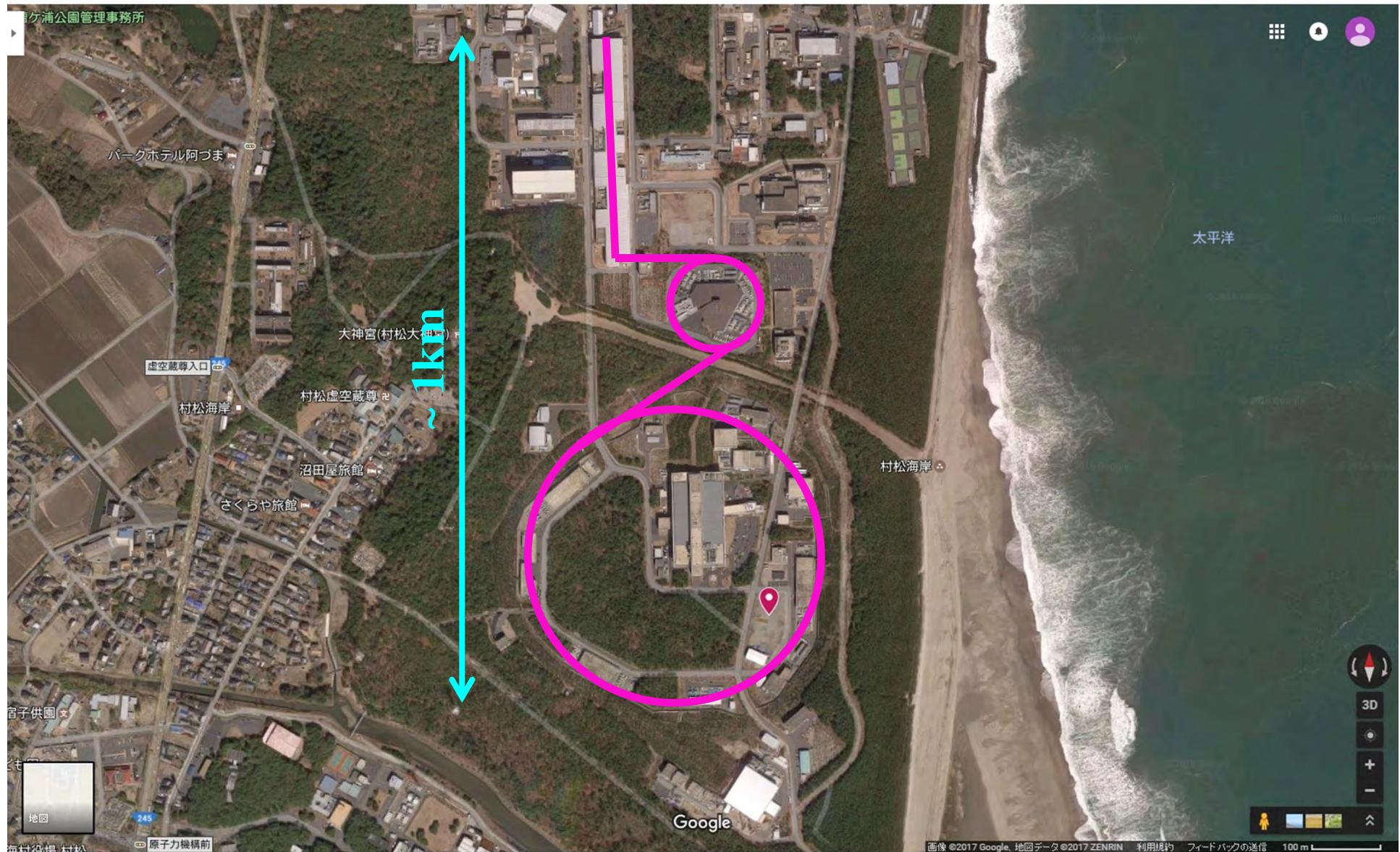


無駄にでかいのが特徴

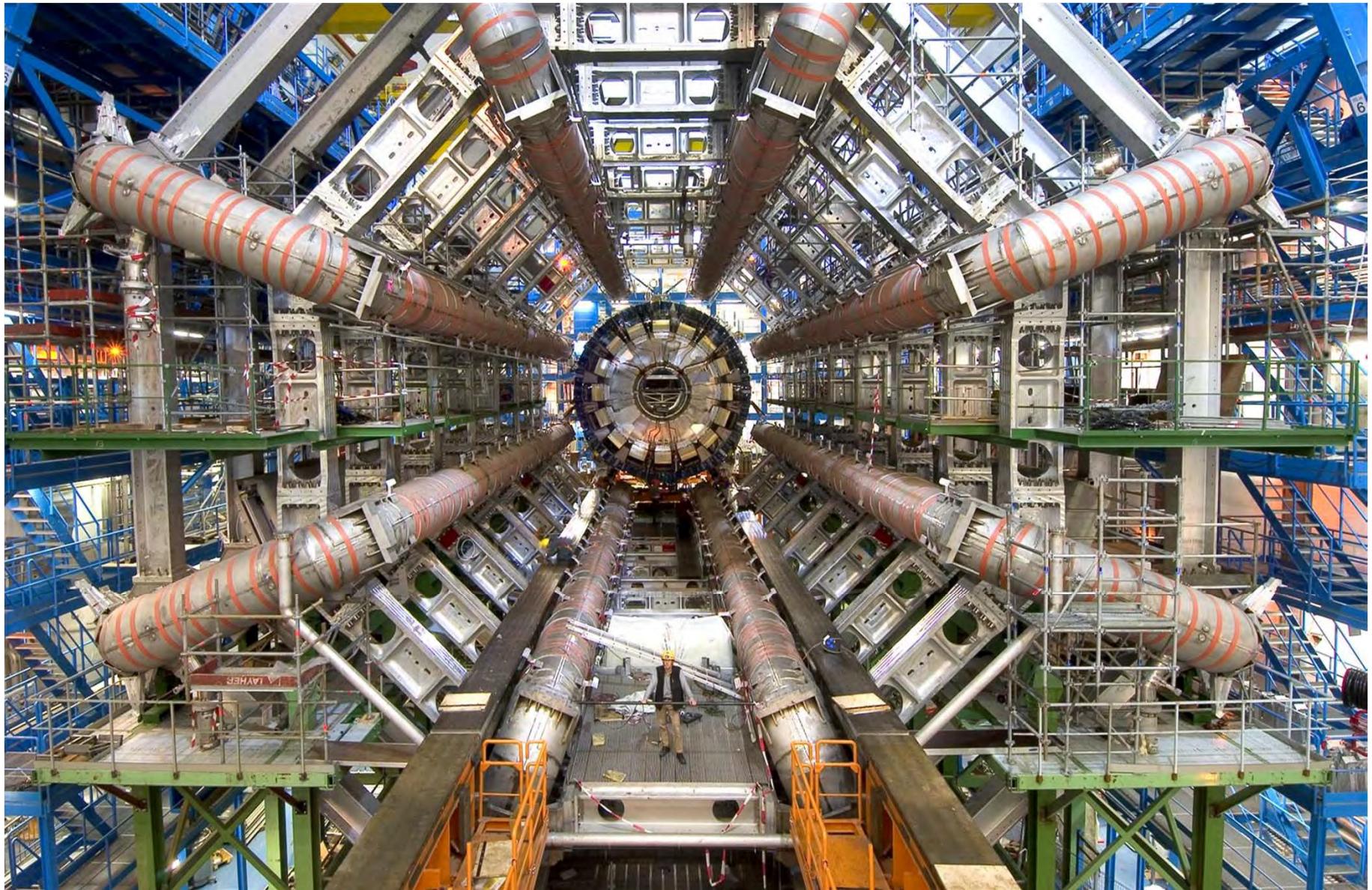
J-PARC



J-PARC

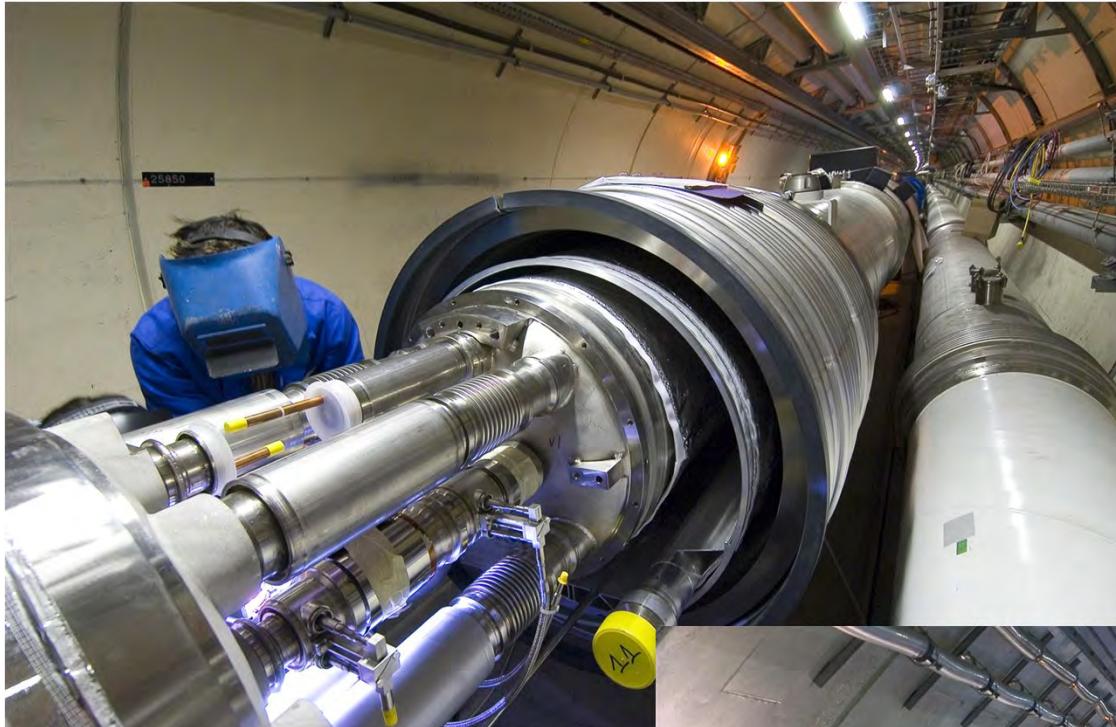


LHC：人類最大の加速器

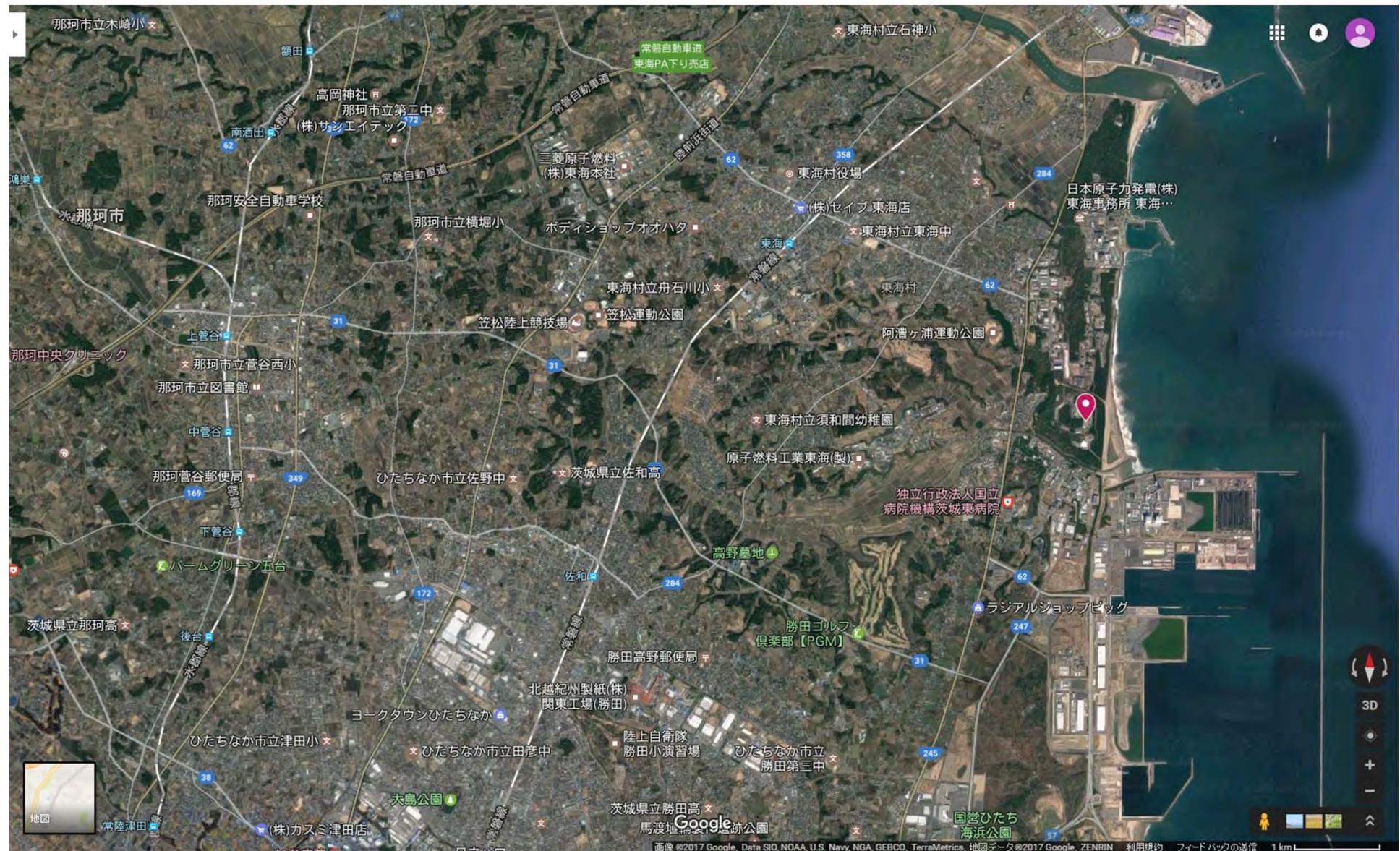


LHC

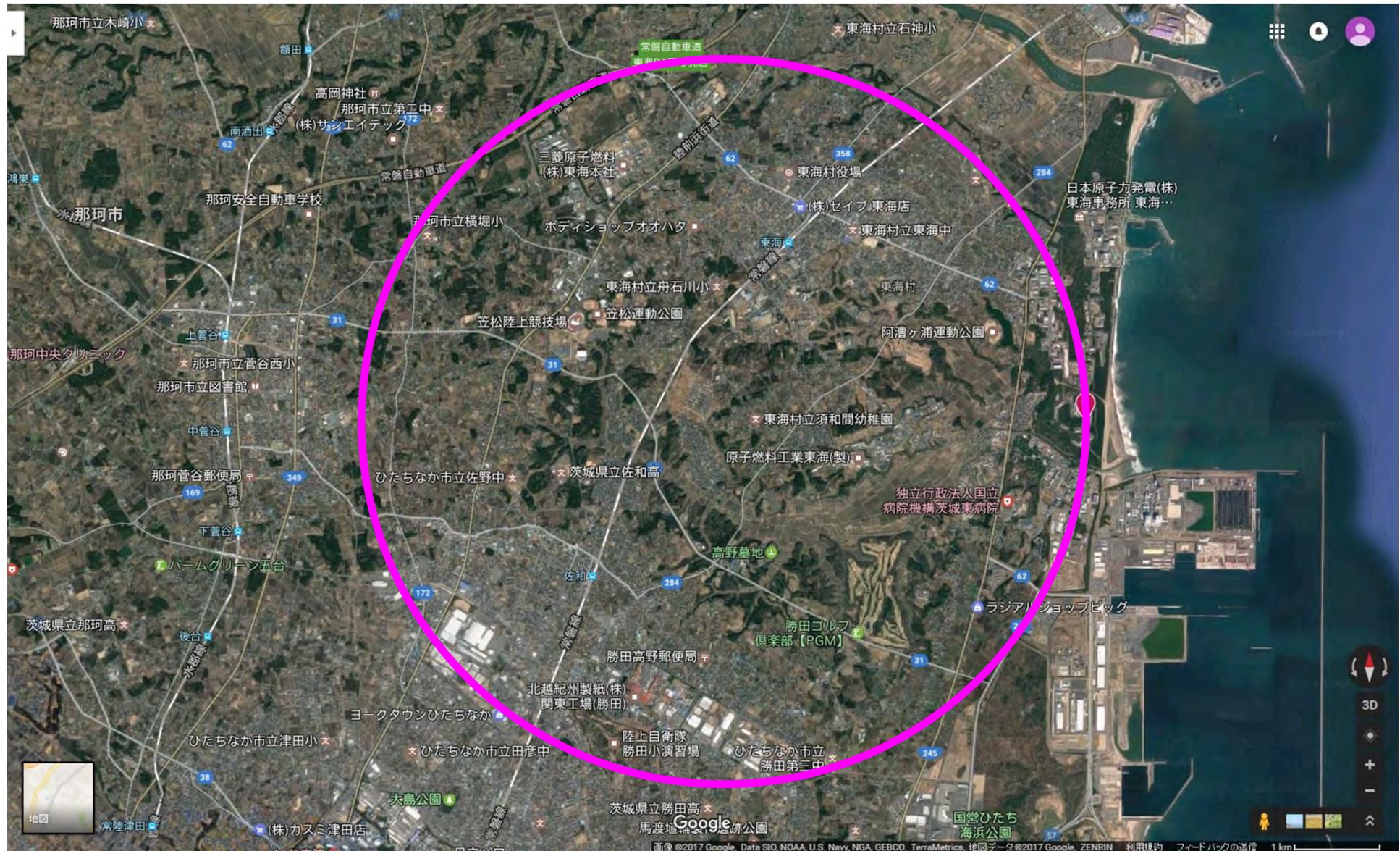
：人類最大の加速器



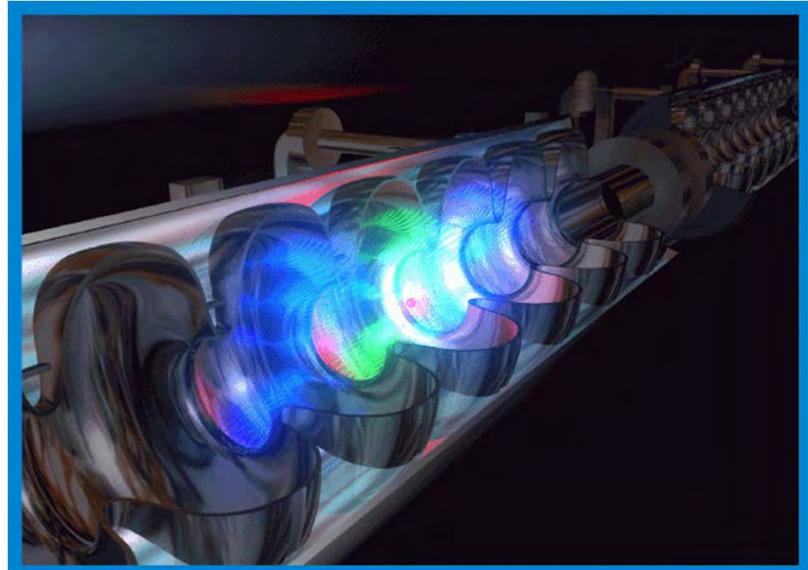
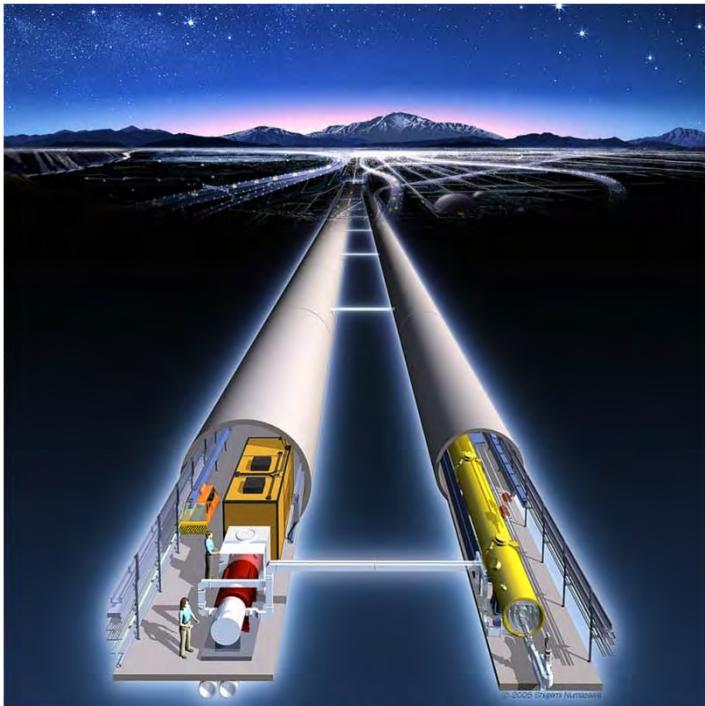
J-PARCにLHCがあったら. . .



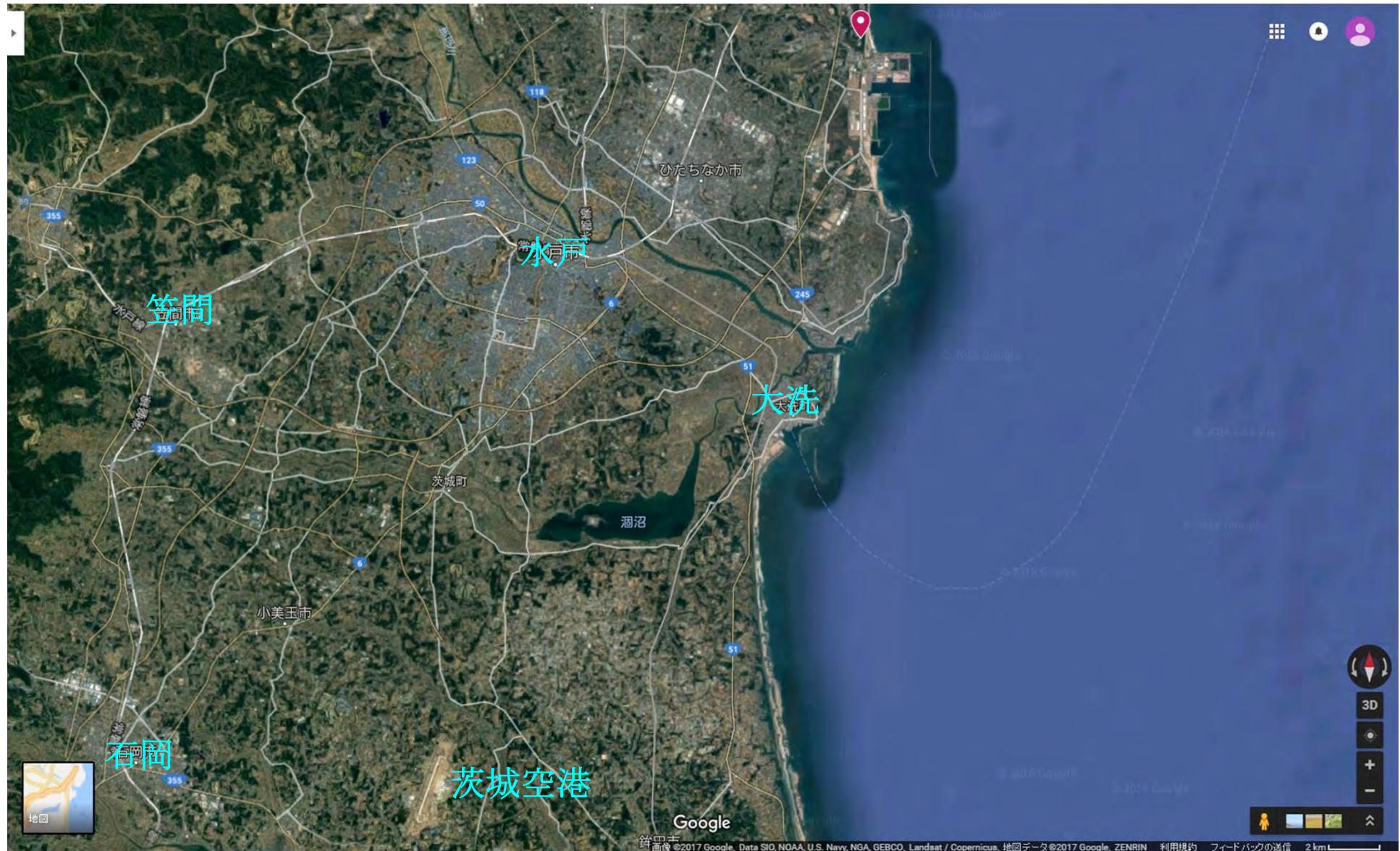
J-PARCにLHCがあったら. . .



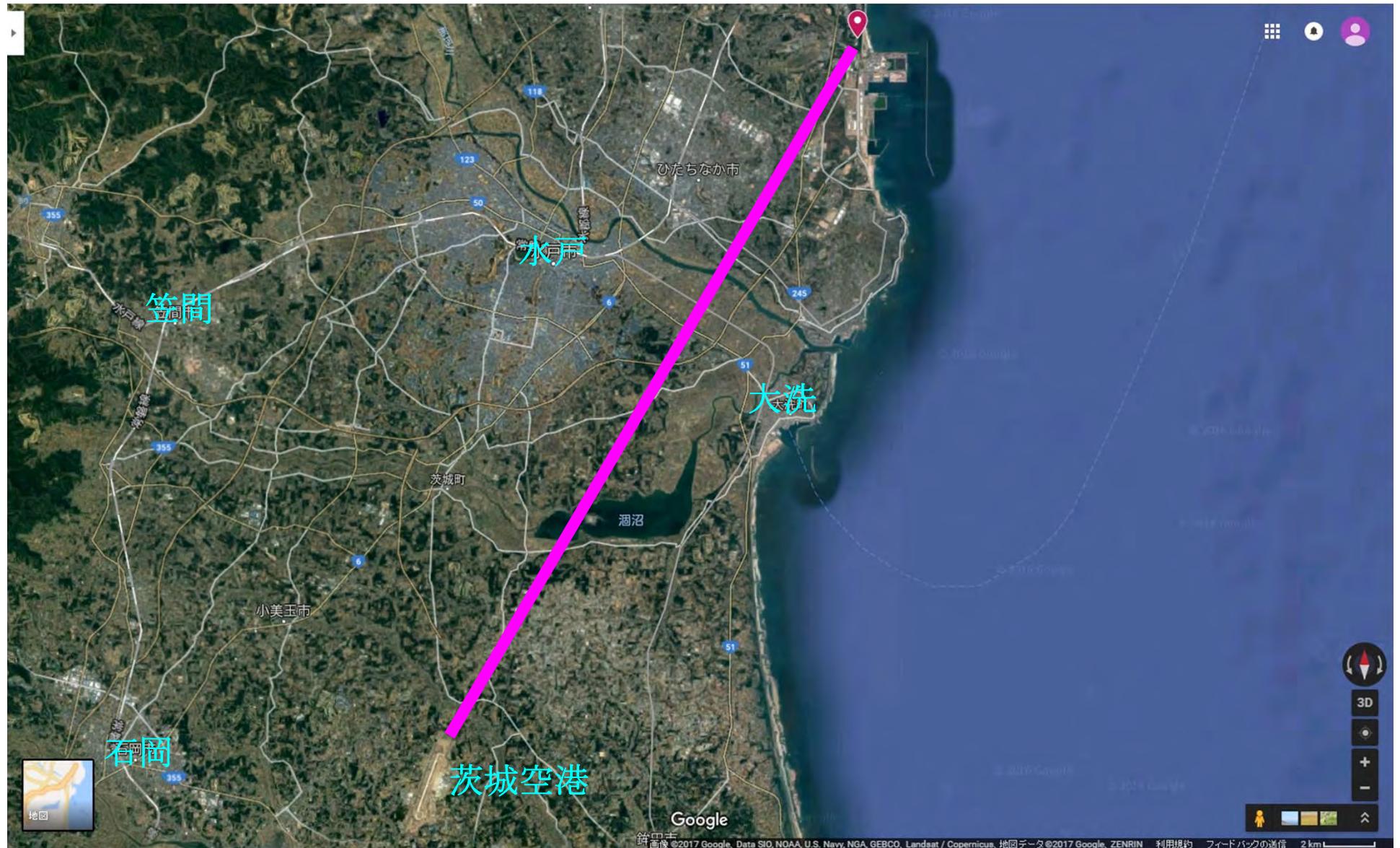
ILC : 現在計画中の史上空前の加速器



J-PARCにILCがあったら. . .

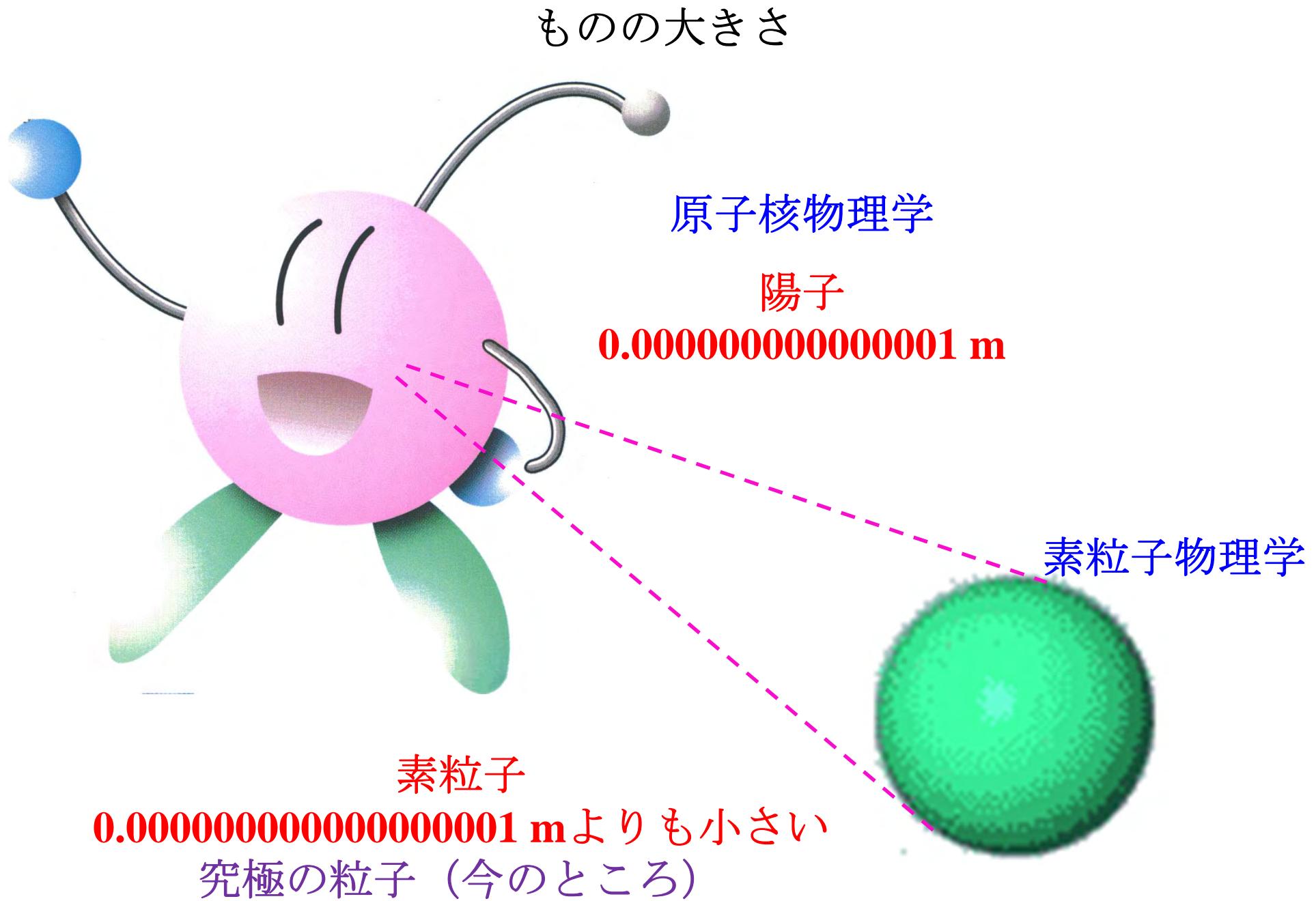


J-PARCにILCがあったら. . .



素粒子物理学に於ける加速器

素粒子物理学者の仕事：物質の中身を調べる
(構造・性質・法則)



もの大きさ

原子核物理学

陽子

0.0000000000000001 m

素粒子物理学

素粒子

0.0000000000000001 m よりも小さい

究極の粒子 (今のところ)

素粒子物理学に於ける加速器

素粒子物理学者の仕事：物質の中身を調べる
(構造・性質・法則)

素粒子物理学に於ける加速器

素粒子物理学者の仕事：物質の中身を調べる
(構造・性質・法則)



ぶつけて壊して調べる！

素粒子物理学に於ける加速器

素粒子物理学者の仕事：物質の中身を調べる
(構造・性質・法則)



ぶつけたて壊して調べる！

より速くぶつけたほうがより細かく壊れる
(より微細な構造を調べることが出来る)

素粒子物理学に於ける加速器

素粒子物理学者の仕事：物質の中身を調べる
(構造・性質・法則)



ぶつけたて壊して調べる！

より速くぶつけたほうがより細かく壊れる
(より微細な構造を調べることが出来る)



粒子を加速する

素粒子物理学に於ける加速器

素粒子物理学者の仕事：物質の中身を調べる
(構造・性質・法則)

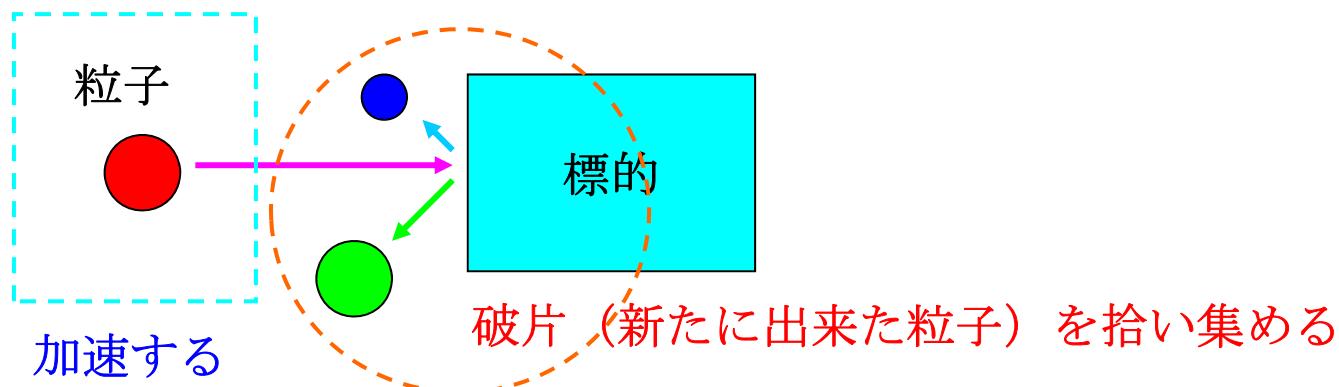


ぶつけたて壊して調べる！

より速くぶつけたほうがより細かく壊れる
(より微細な構造を調べることが出来る)



粒子を加速する



第3回

反物質

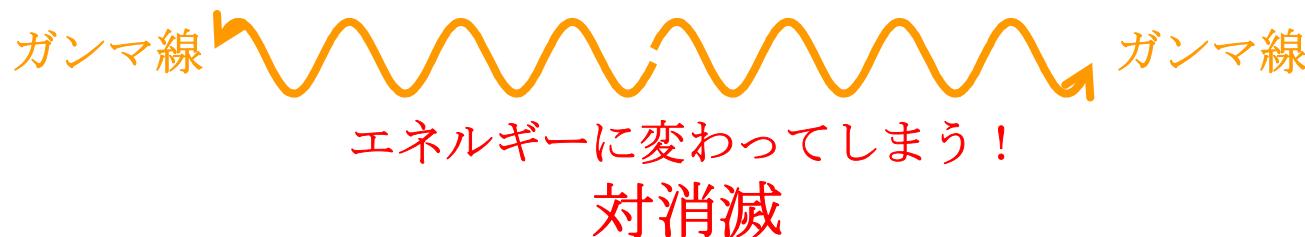
反粒子：質量等が同じで、電荷が逆の粒子

電子 \longleftrightarrow 陽電子

陽子 \longleftrightarrow 反陽子

ニュートリノ \longleftrightarrow 反ニュートリノ

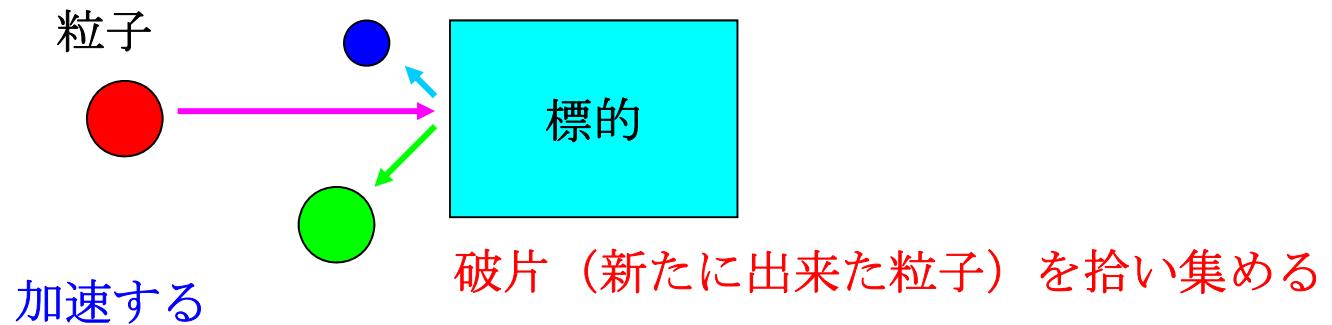
物質と反物質が出逢うと、、

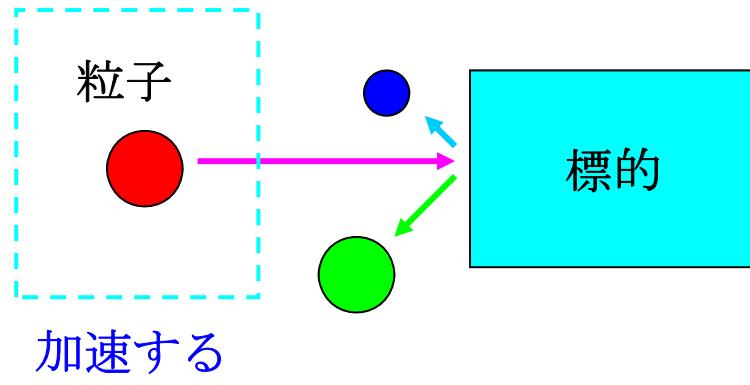


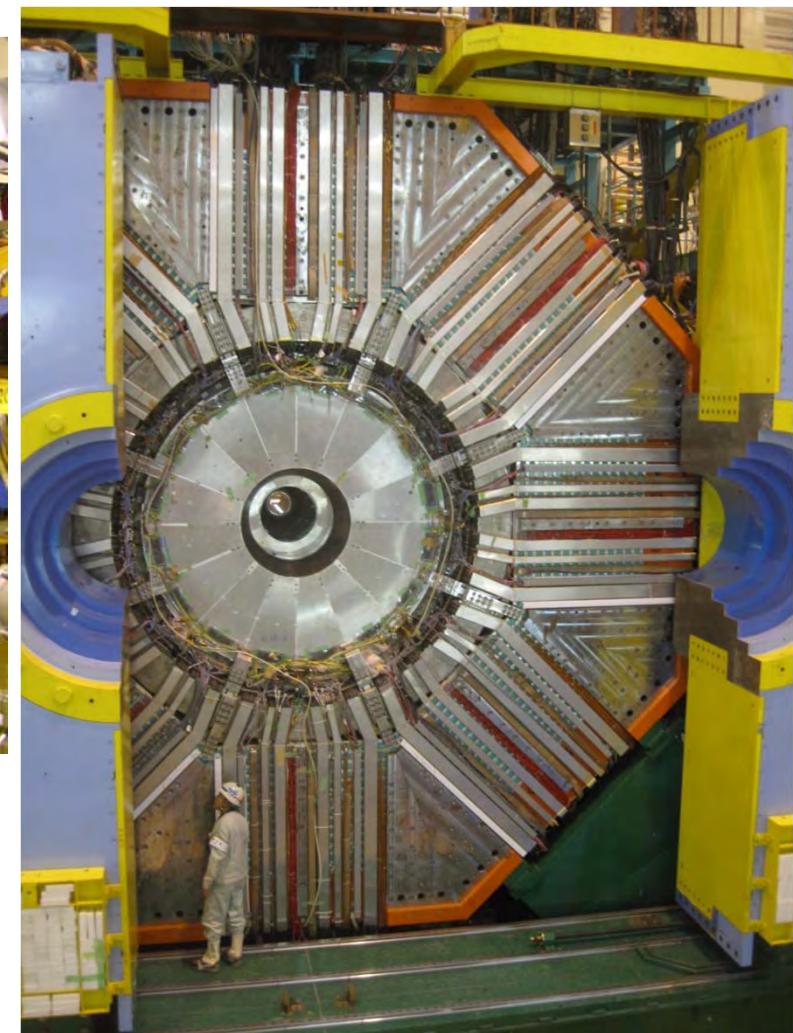
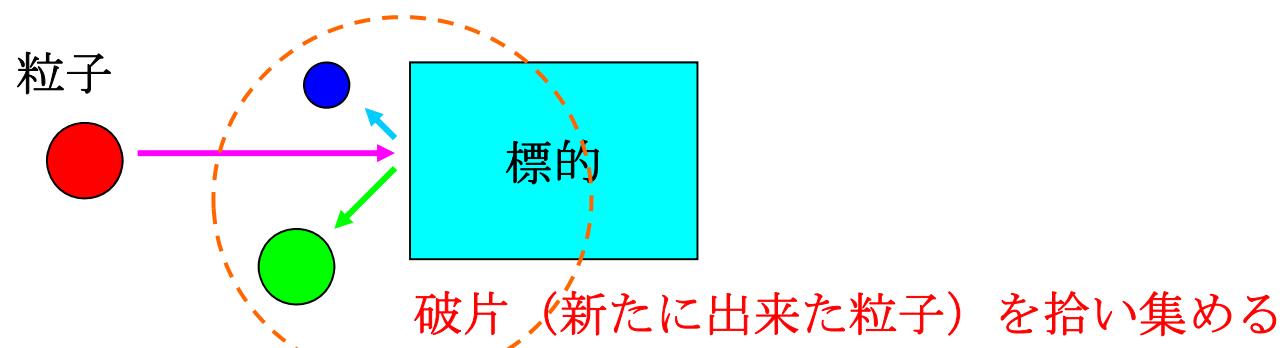
逆に、充分なエネルギーがあると、



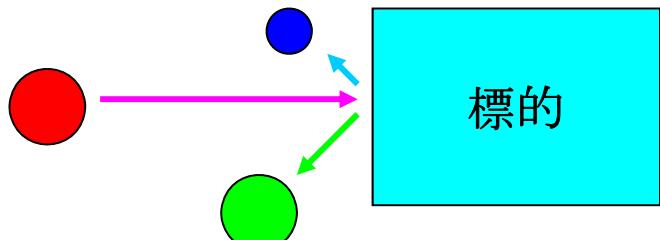
宇宙にある物質は、このようにして生まれた！





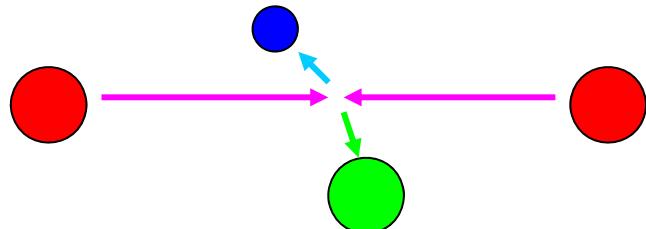


加速器の種類

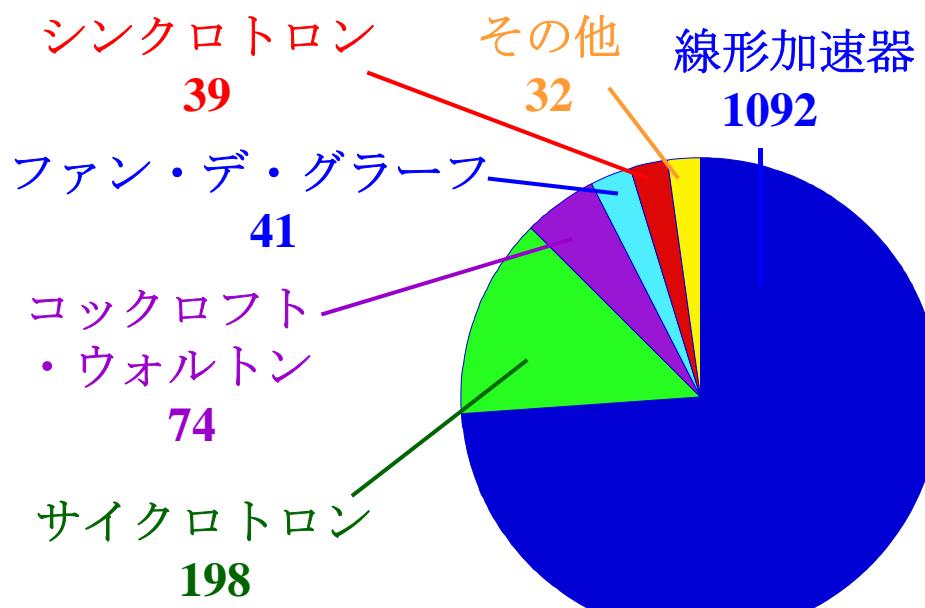


静止標的型
数が欲しい
J-PARC
(ニュートリノを
毎秒1000兆個つくる)

↑
衝突型
エネルギーが欲しい
**KEKB、LHC、ILC、
LEP、Tevatron、SLAC**



		形状	
		線形	円形
粒子	電子	ILC、SLAC	KEKB、LEP
	陽子		J-PARC、LHC 、Tevatron



日本の誇る加速器の技術

日本は世界最高の加速器技術を持っている
超伝導加速空腔
超並行ビーム生成

日本の誇る加速器の技術

日本は世界最高の加速器技術を持っている

超伝導加速空腔

超並行ビーム生成

日本には世界最強・最高の加速器がある

KEKB：衝突型加速器電子加速器として世界最強

J-PARC：静止標的型陽子加速器として世界最強

Spring-8：放射光施設として世界最高性能

日本の誇る加速器の技術

日本は世界最高の加速器技術を持っている
超伝導加速空腔
超並行ビーム生成

日本には世界最強・最高の加速器がある
KEKB：衝突型加速器電子加速器として世界最強
J-PARC：静止標的型陽子加速器として世界最強
Spring-8：放射光施設として世界最高性能

素粒子物理学の分野では世界最先端
例えば、ニュートリノ物理学では
世界で最初に長基線ニュートリノ振動実験を成功させた
J-PARCの次世代ニュートリノビームラインは世界最高性能
スーパーカミオカンデという世界最高のニュートリノ検出器がある

日本の誇る加速器の技術

日本は世界最高の加速器技術を持っている
超伝導加速空腔
超並行ビーム生成

日本には世界最強・最高の加速器がある
KEKB：衝突型加速器電子加速器として世界最強
J-PARC：静止標的型陽子加速器として世界最強
Spring-8：放射光施設として世界最高性能

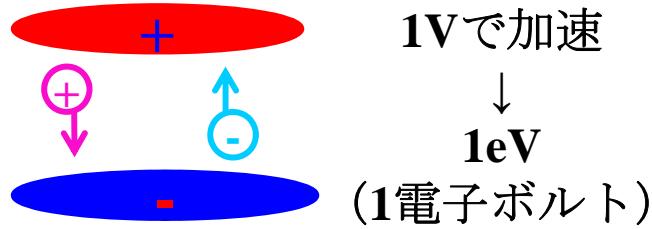
素粒子物理学の分野では世界最先端
例えば、ニュートリノ物理学では
世界で最初に長基線ニュートリノ振動実験を成功させた
J-PARCの次世代ニュートリノビームラインは世界最高性能
スーパーカミオカンデという世界最高のニュートリノ検出器がある



これからも、世界をリードして行きたい

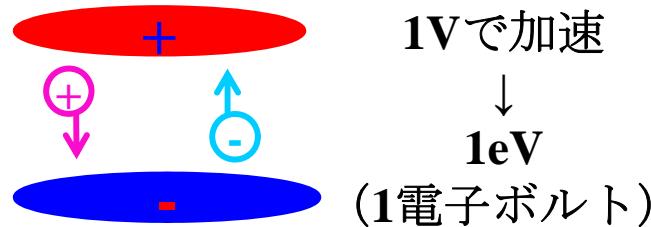
加速器の性能

エネルギー



加速器の性能

エネルギー

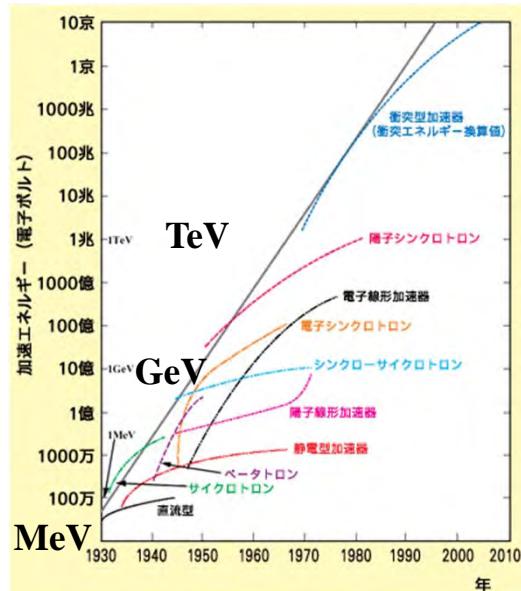


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

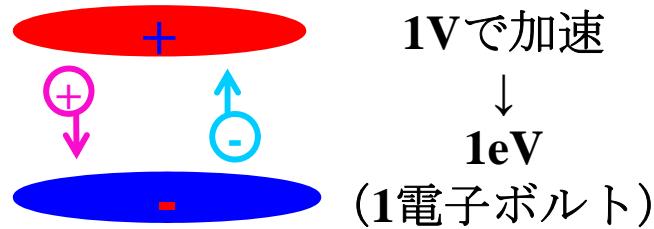
LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



加速器の性能

エネルギー × 個数 = パワー

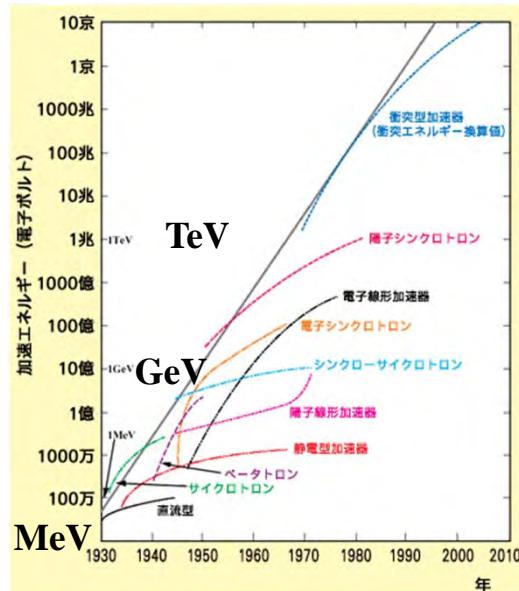


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

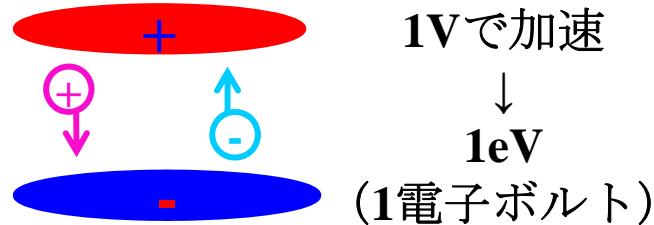
LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



加速器の性能

エネルギー × 個数 = パワー J-PARC : 1MW

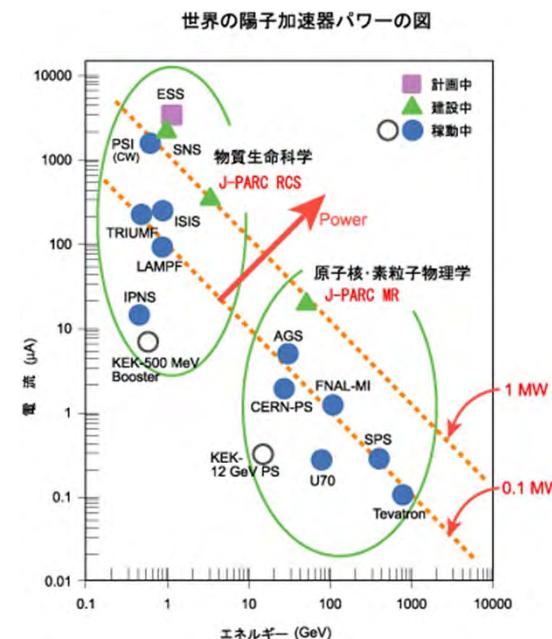
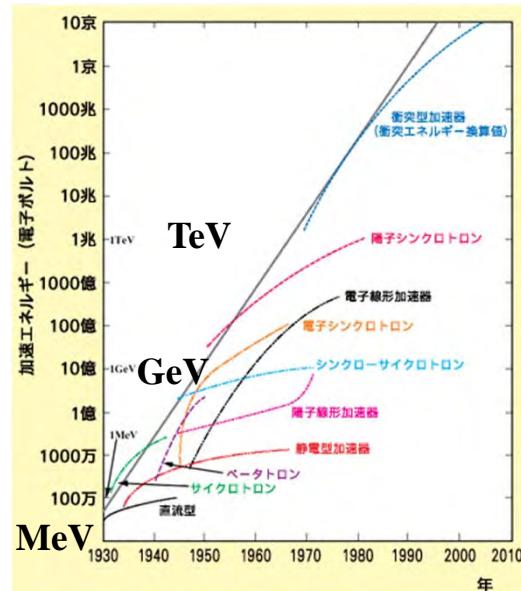


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

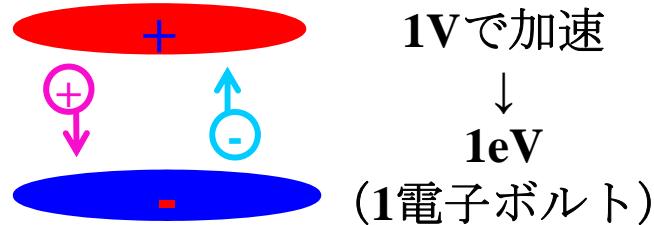
LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



加速器の性能

$$\text{エネルギー} \times \text{個数} = \text{パワー} \quad \text{J-PARC : 1MW}$$

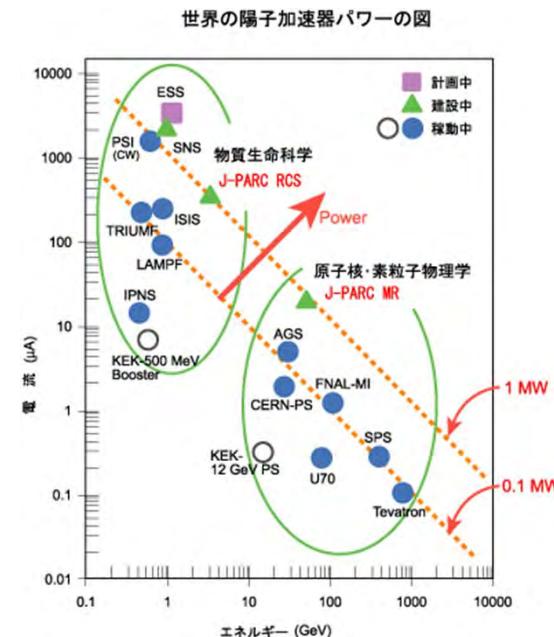
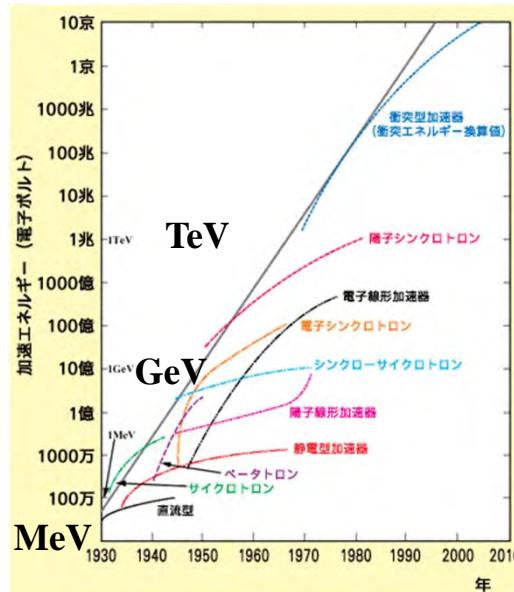


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



J-PARC

総工費1,500億円、史上最大のプロジェクト

参加企業

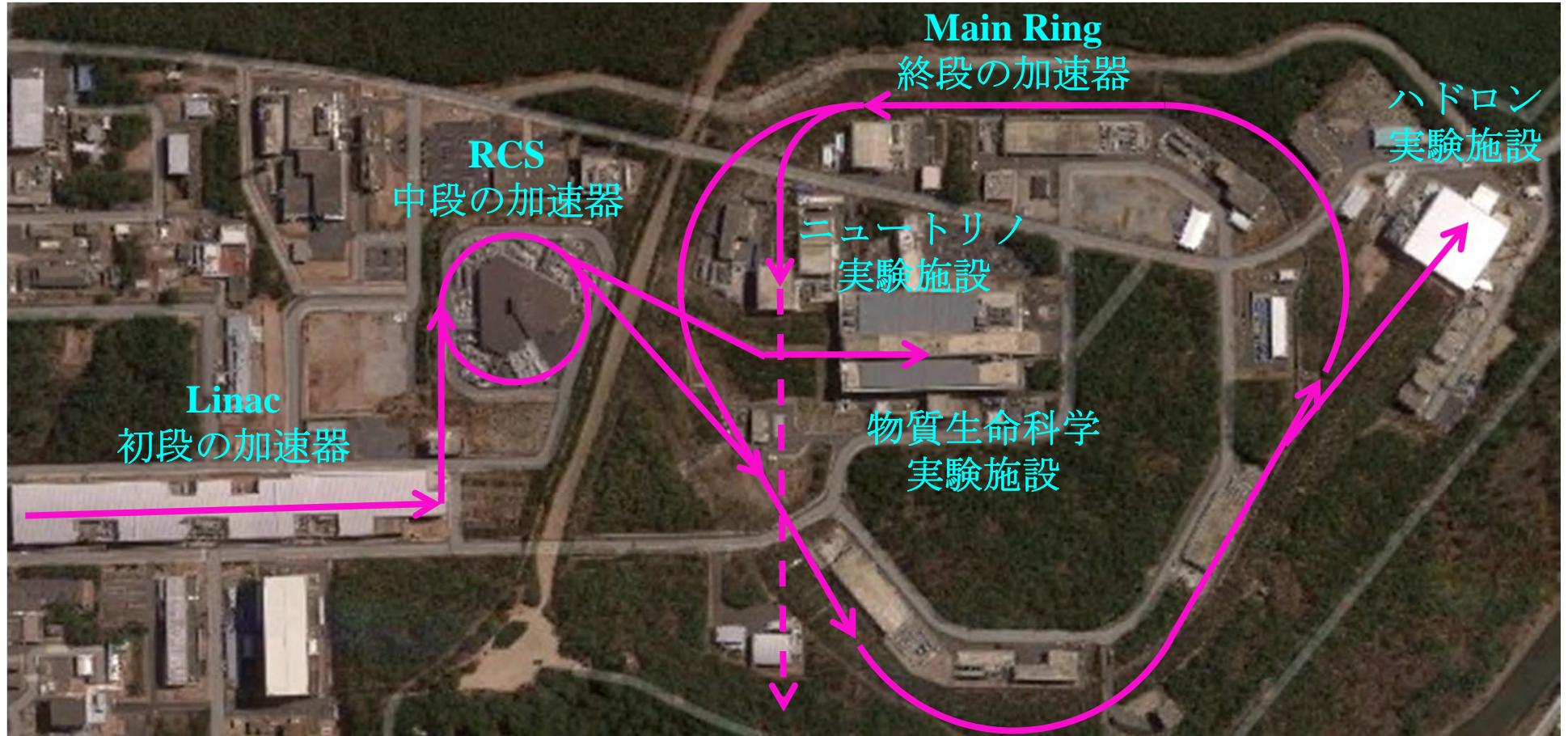
土木建築：スーパーゼネコンの全て+
準大手の半数

実験装置：全ての重工系メーカー、
全ての重電系メーカー

まさに、日本の国家的事業！

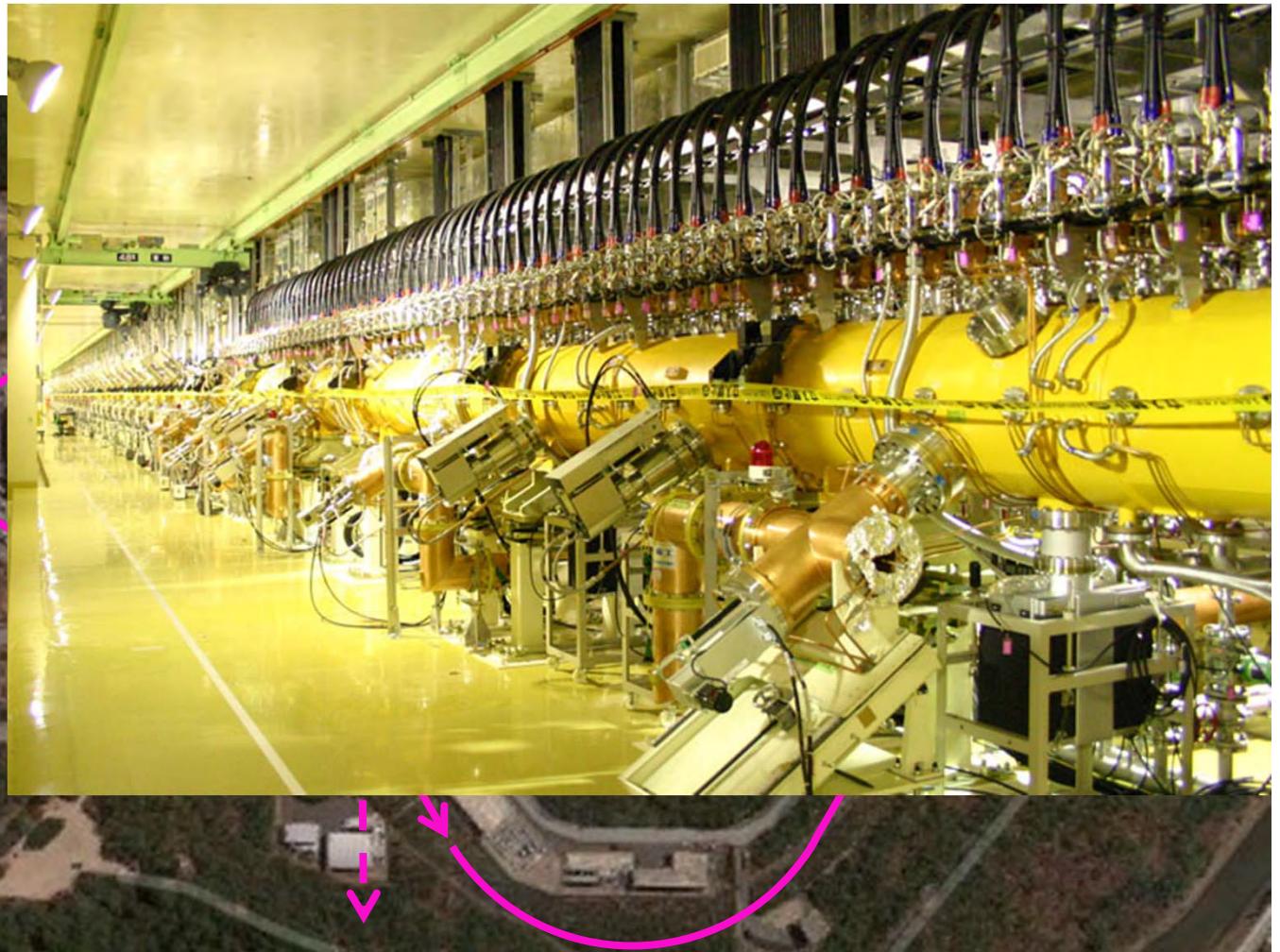
J-PARC

日本が誇る世界最高強度の加速器

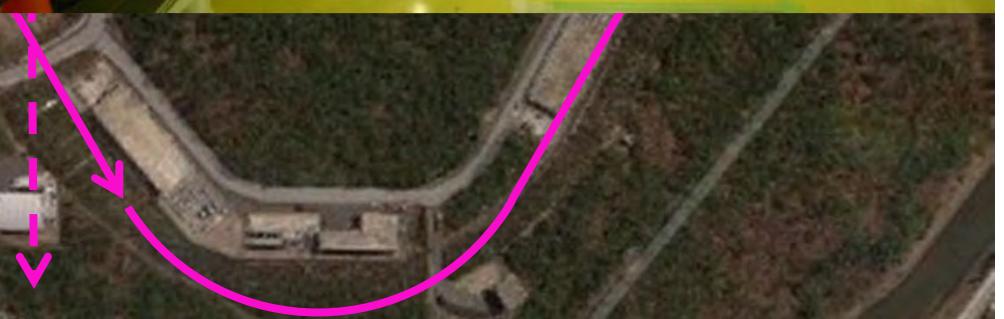
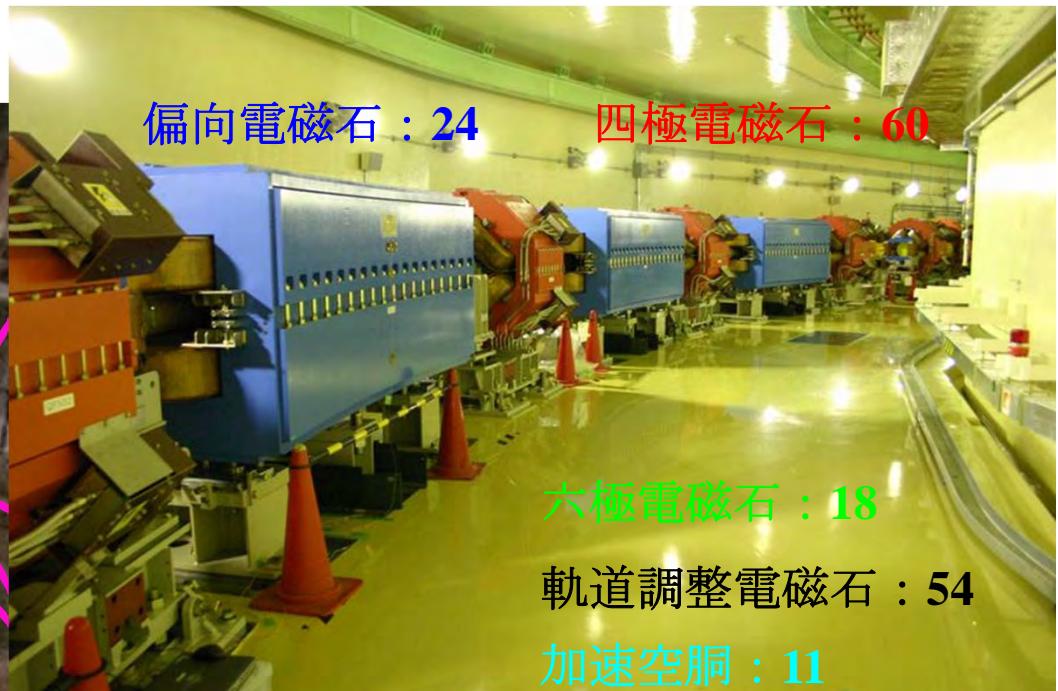


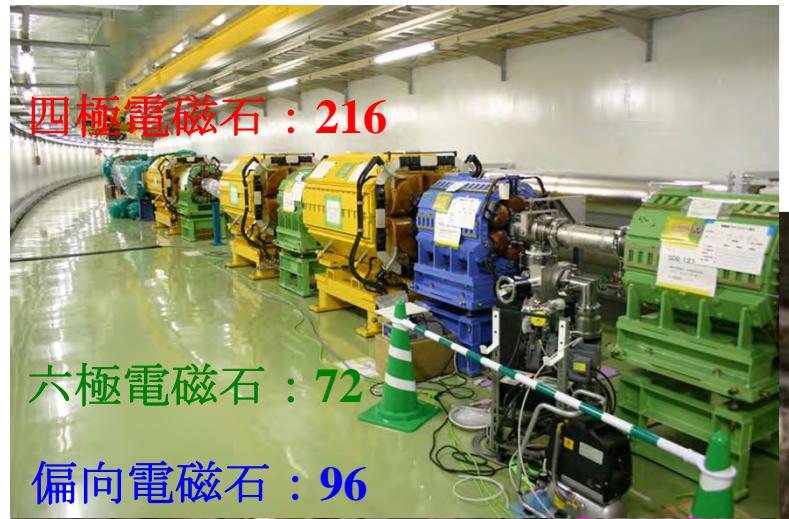
Japan Proton Accelerator Research Complex
標的が複数ある複合実験施設

Linac



RCS



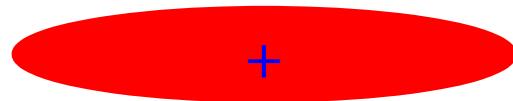


Main Ring

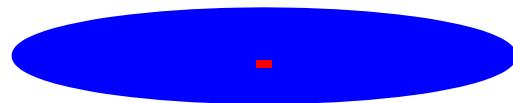


加速器の原理

電場

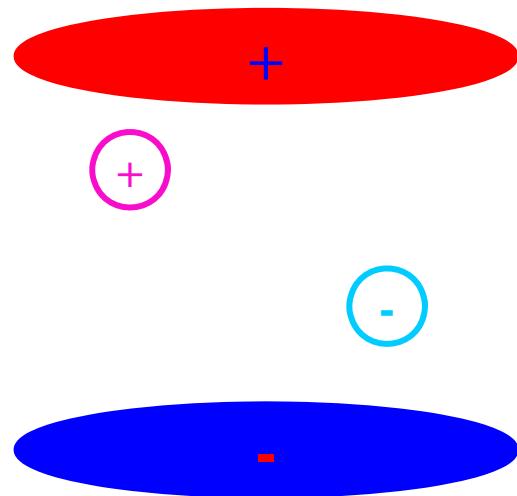


磁場

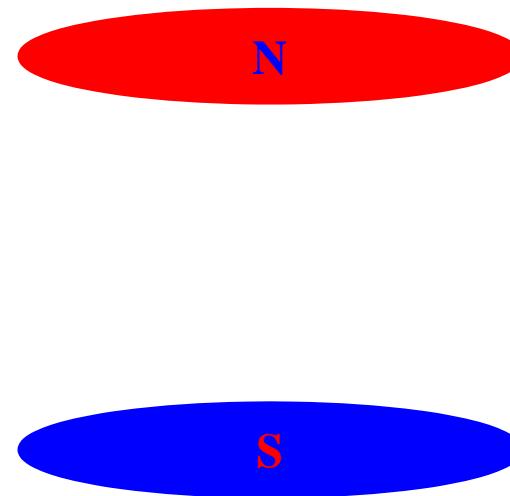


加速器の原理

電場

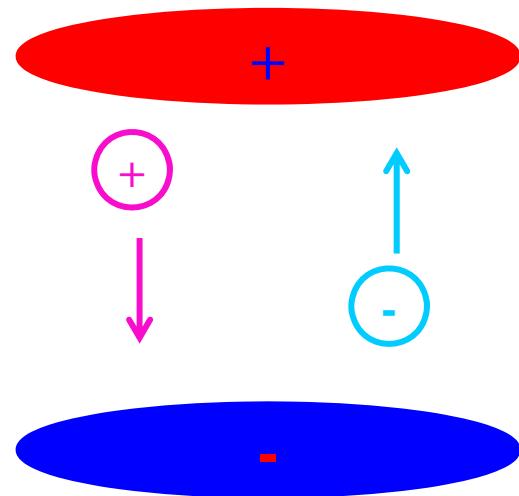


磁場

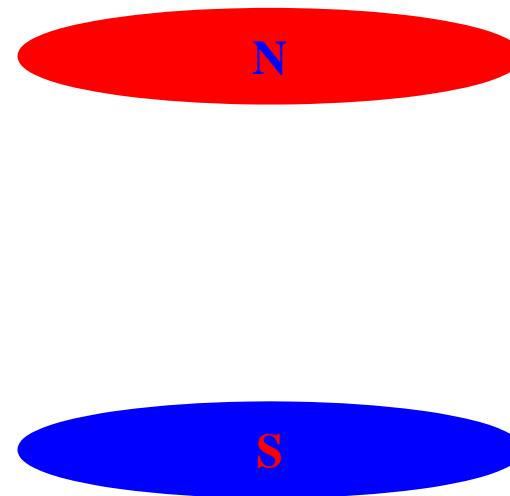


加速器の原理

電場

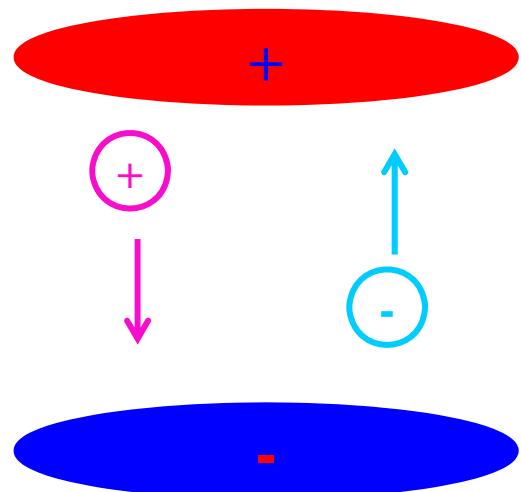


磁場

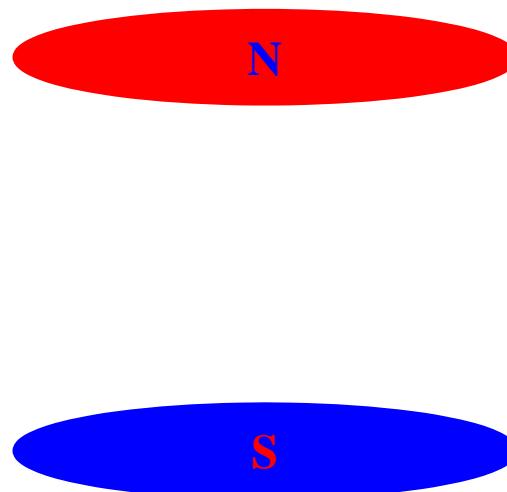


加速器の原理

電場



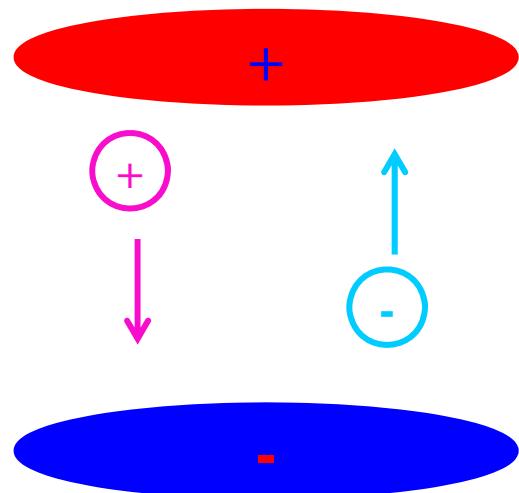
磁場



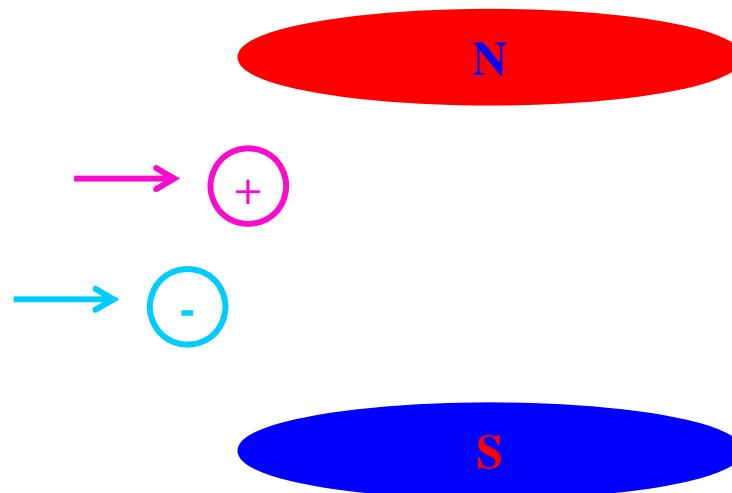
電場で加速する！

加速器の原理

電場



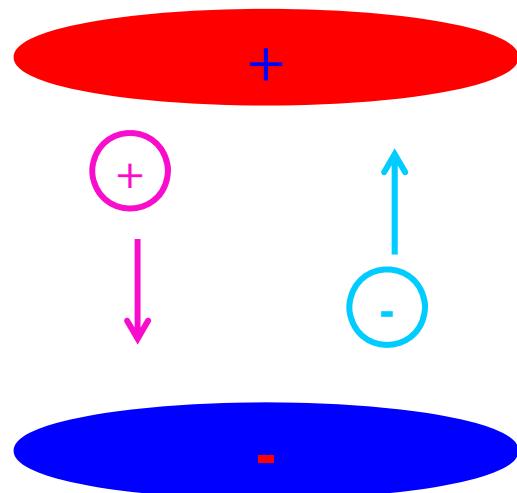
磁場



電場で加速する！

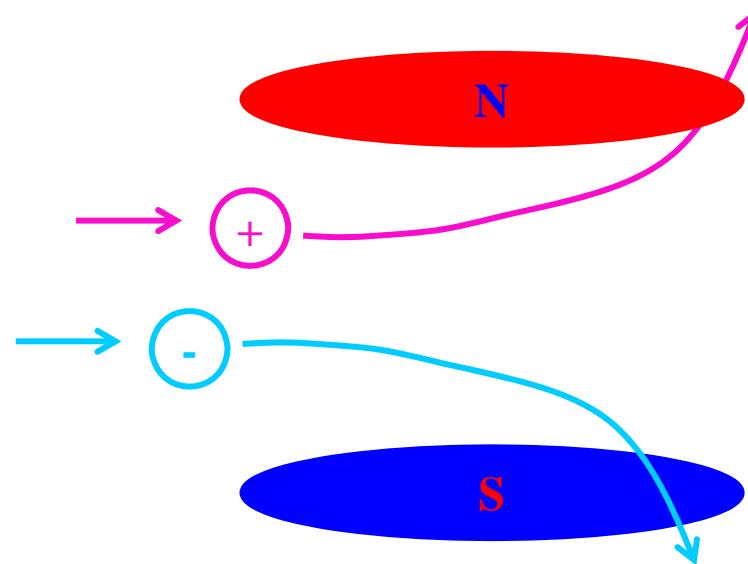
加速器の原理

電場

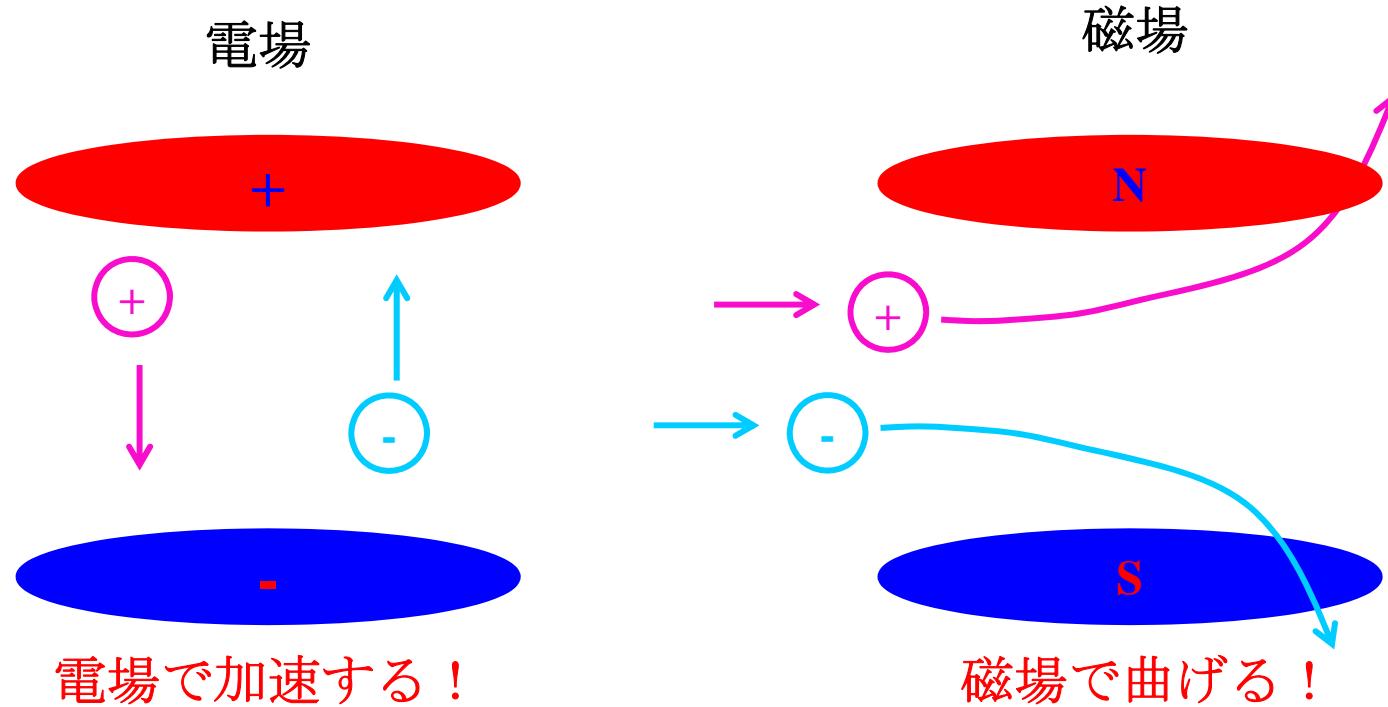


電場で加速する！

磁場

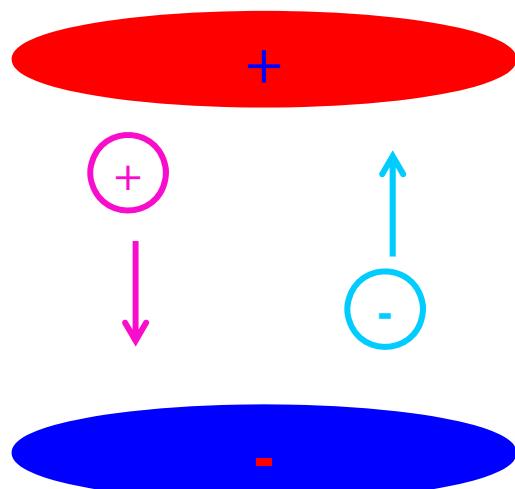


加速器の原理



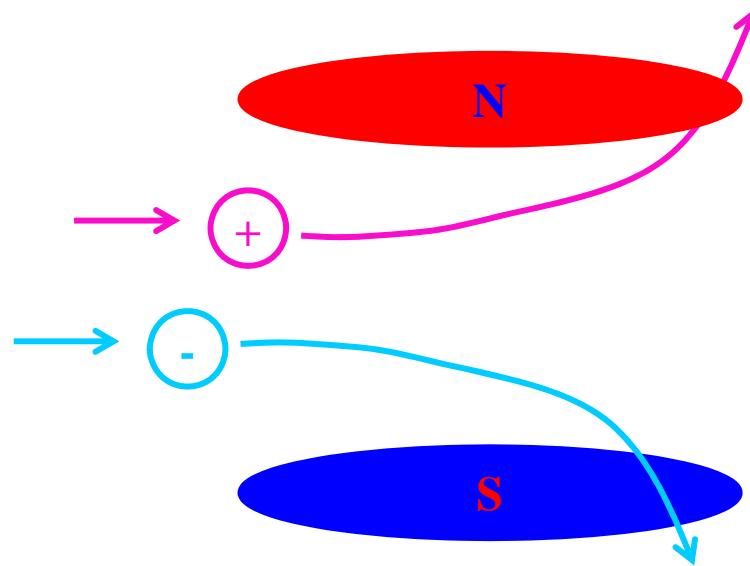
加速器の原理

電場

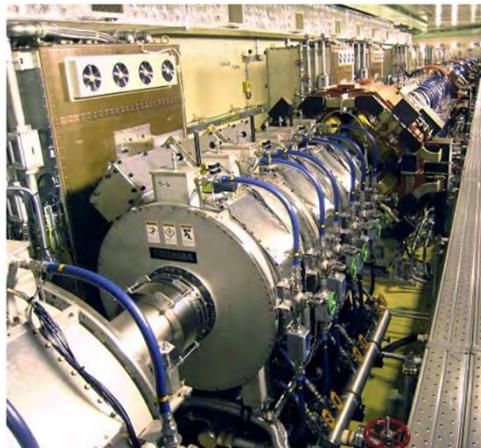


電場で加速する！

磁場



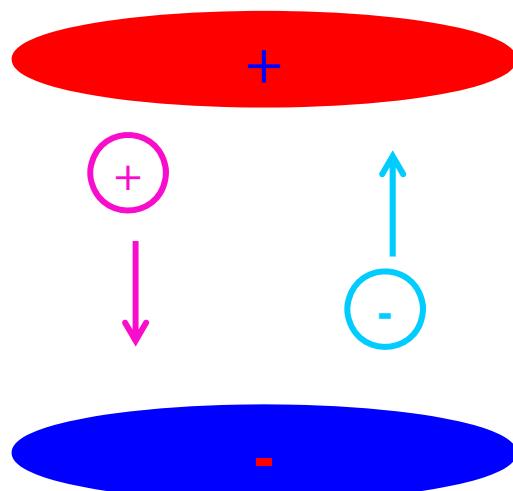
磁場で曲げる！



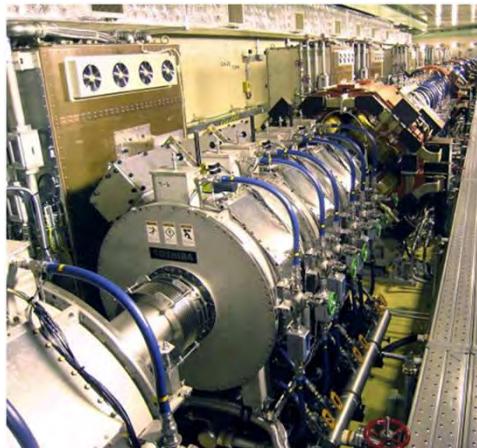
加速空腔

加速器の原理

電場

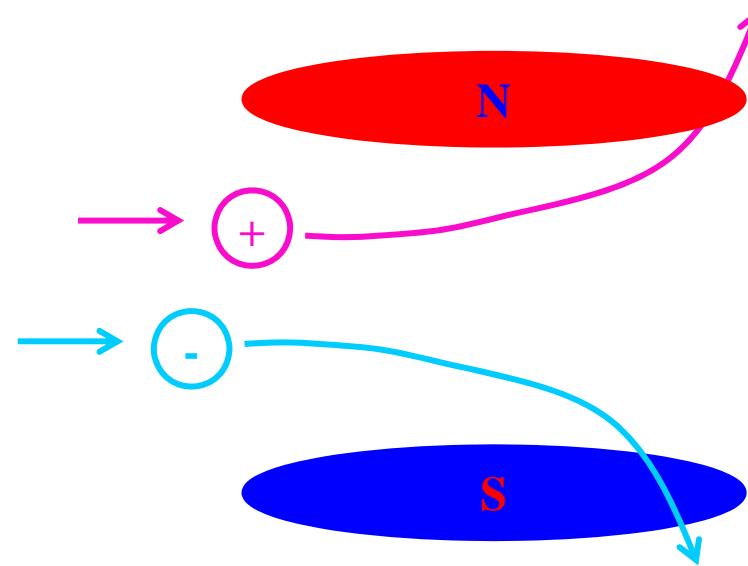


電場で加速する！



加速空腔

磁場

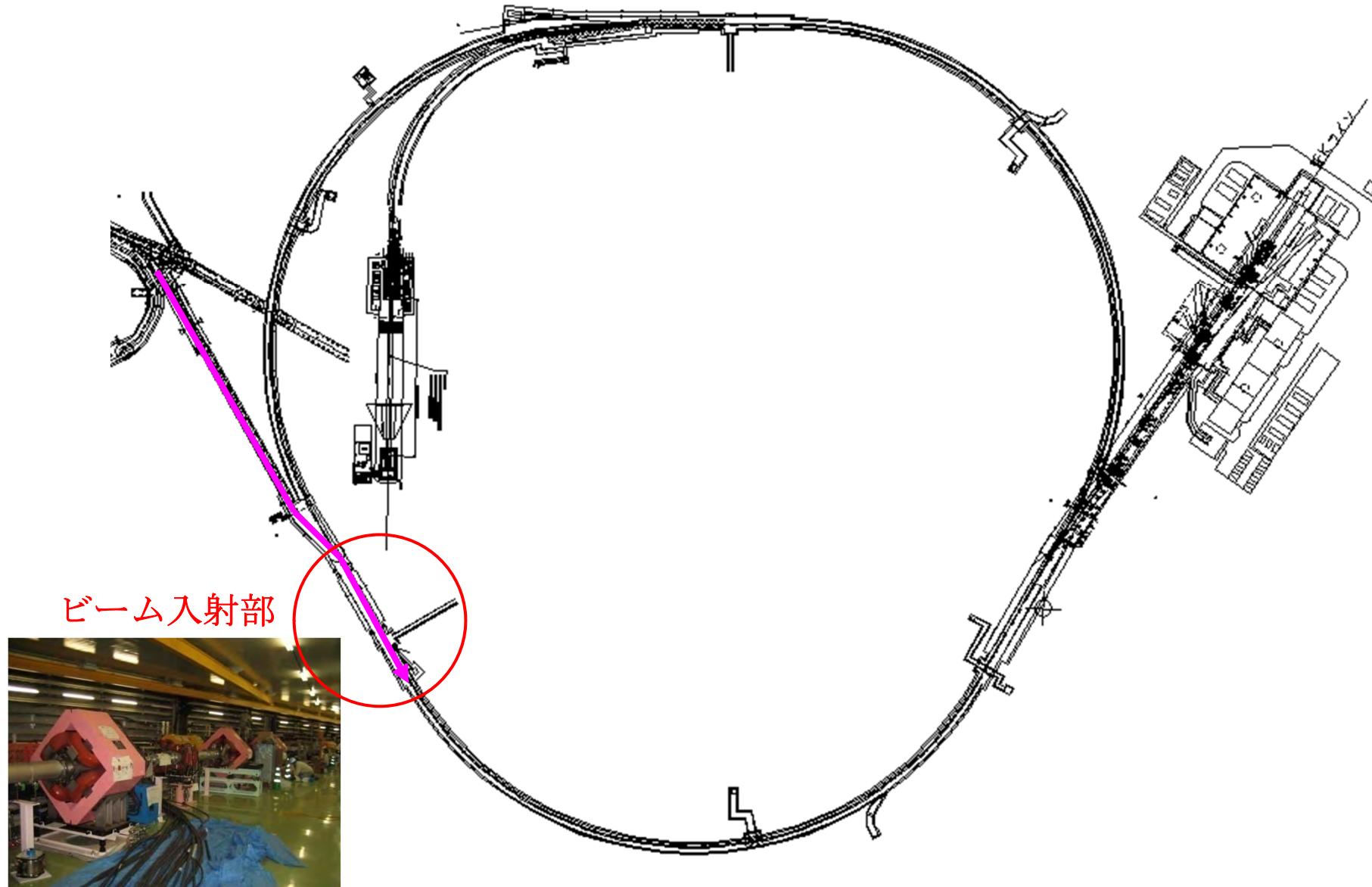


磁場で曲げる！

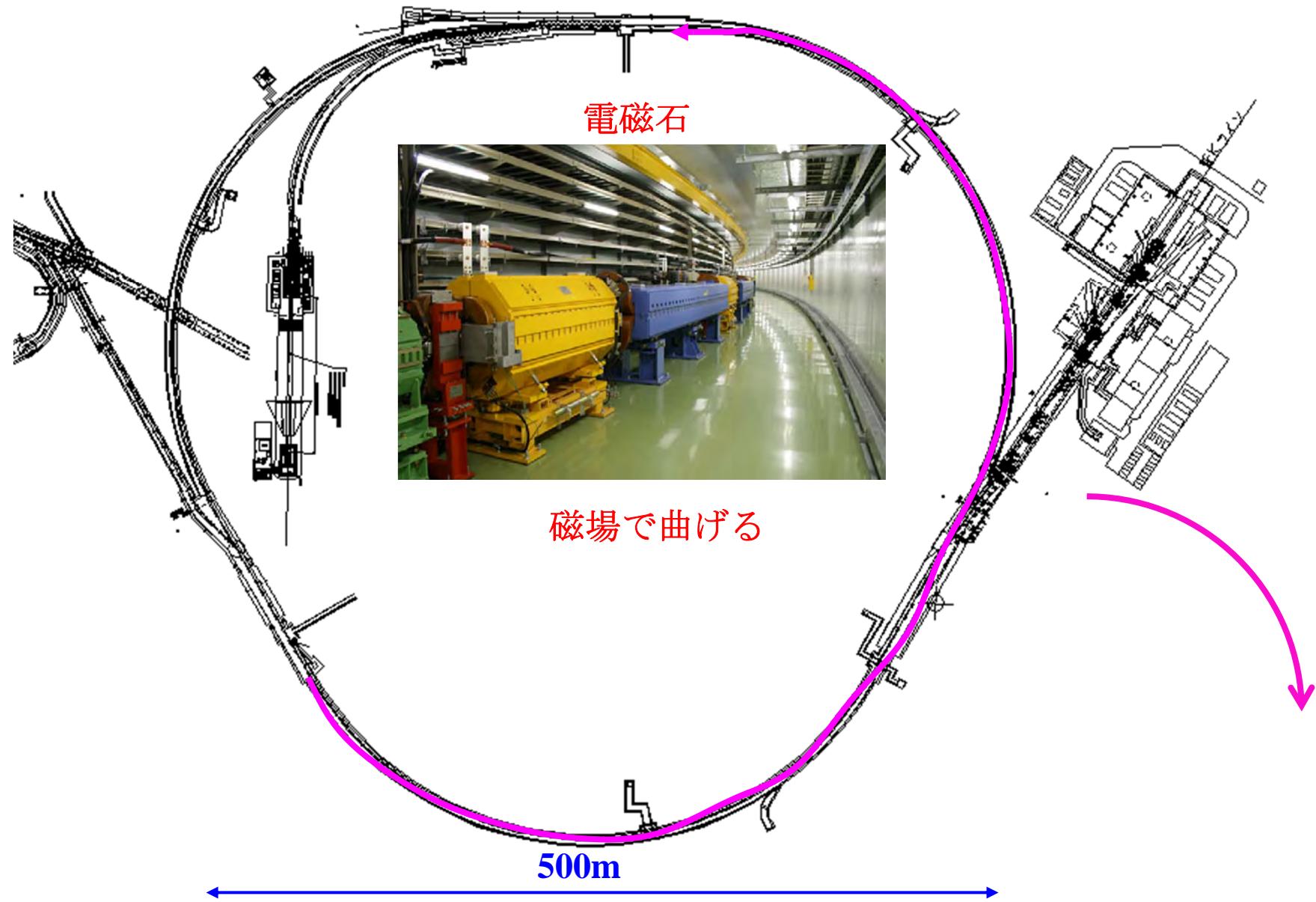


電磁石

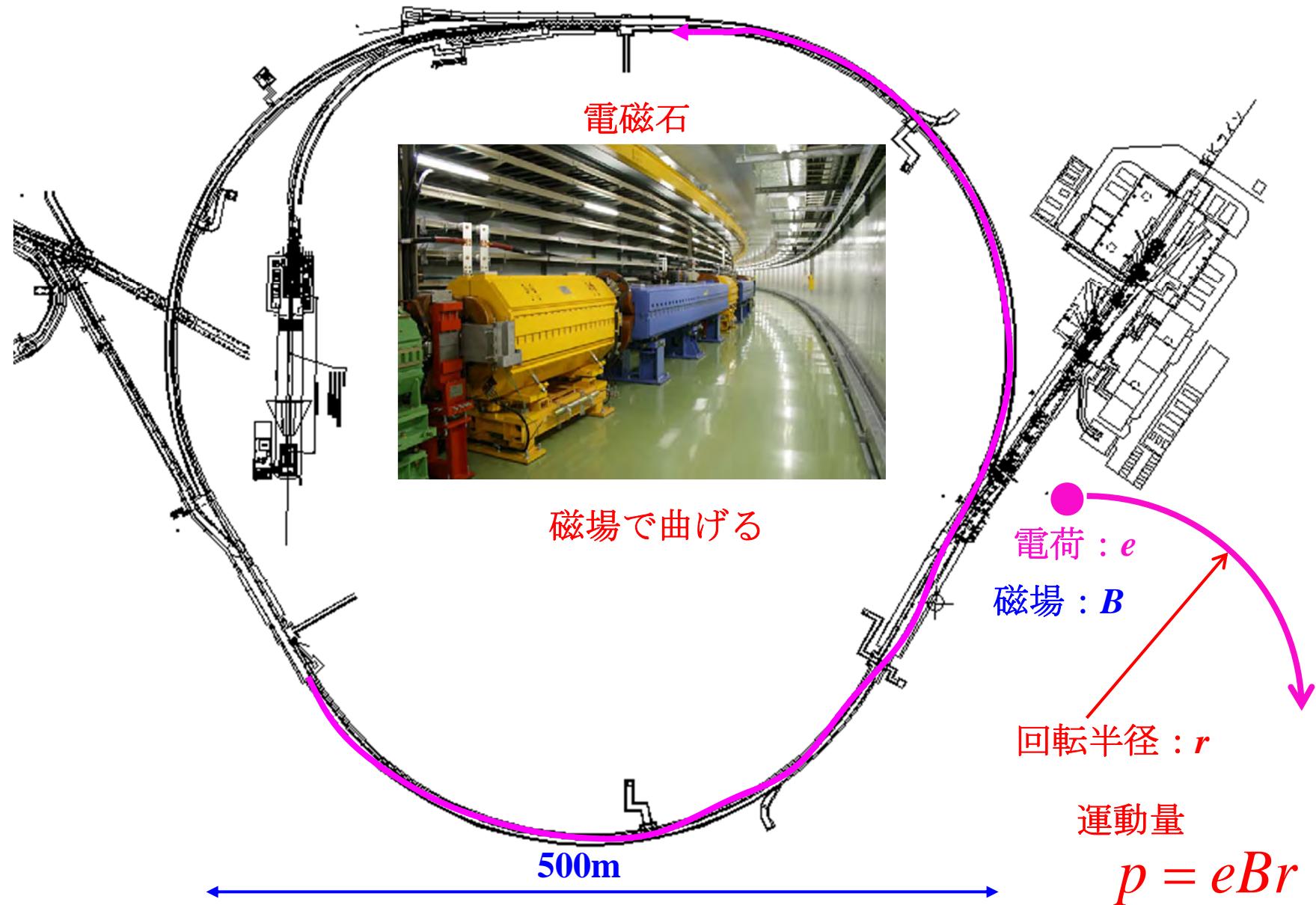
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



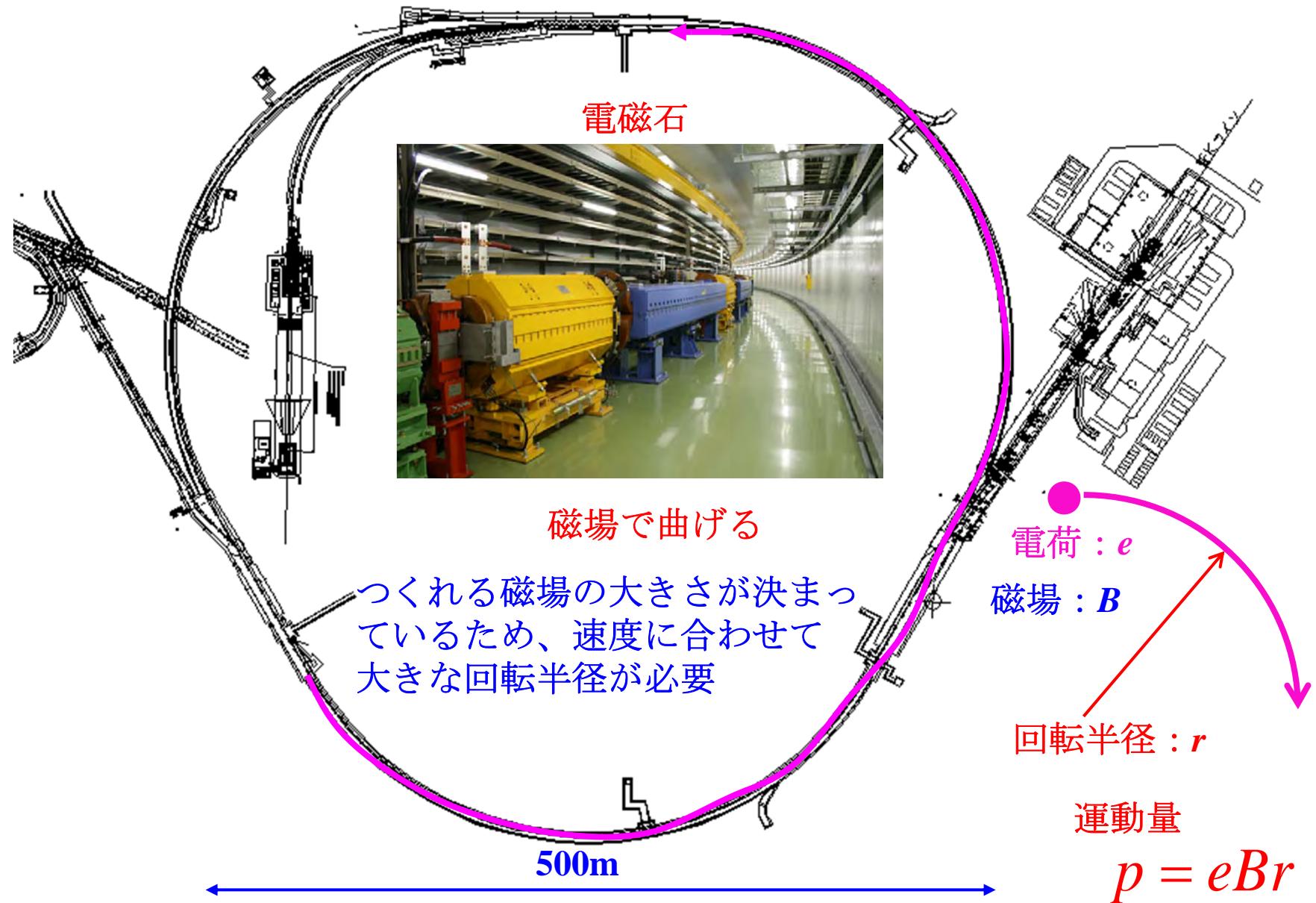
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



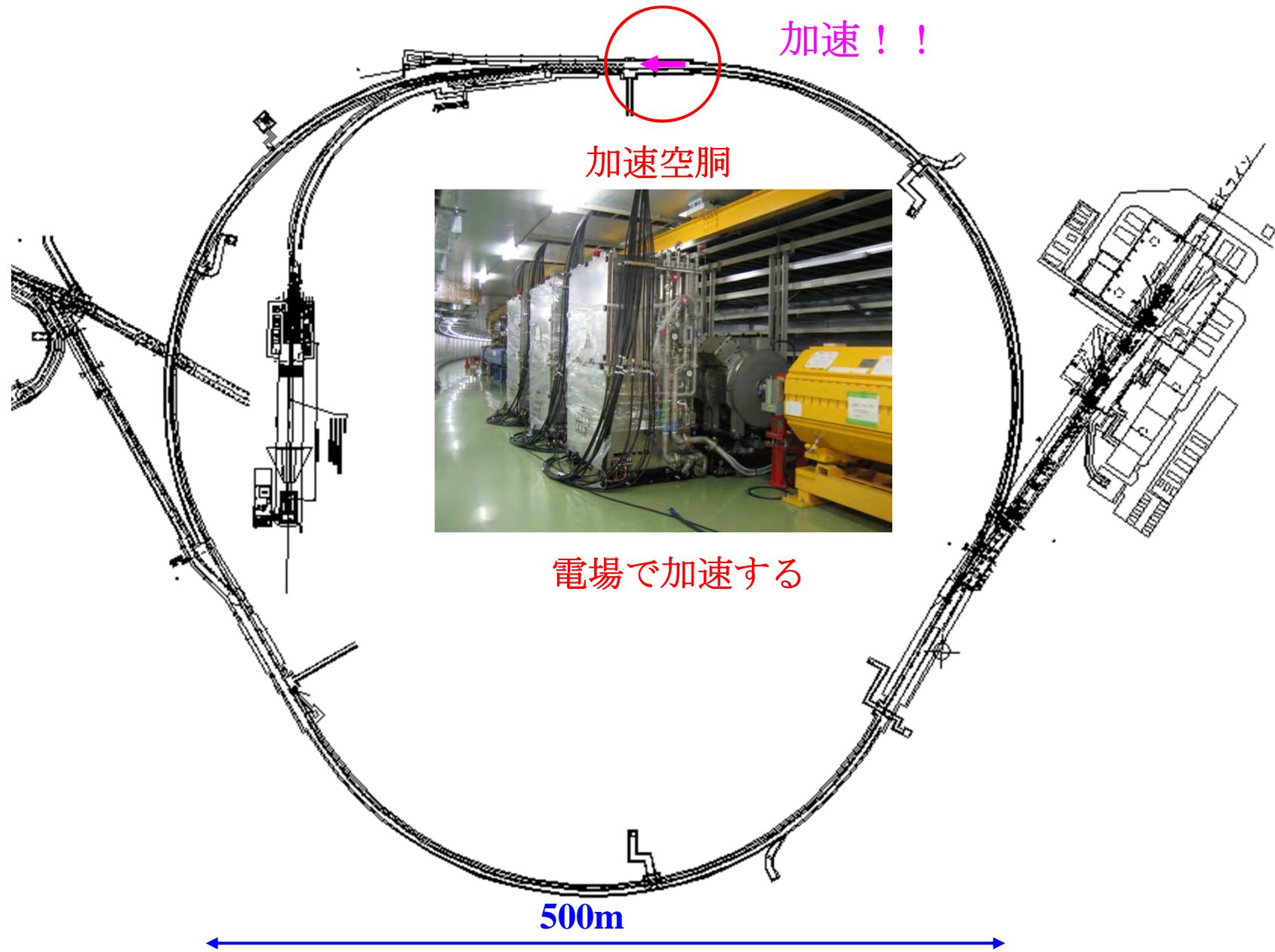
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



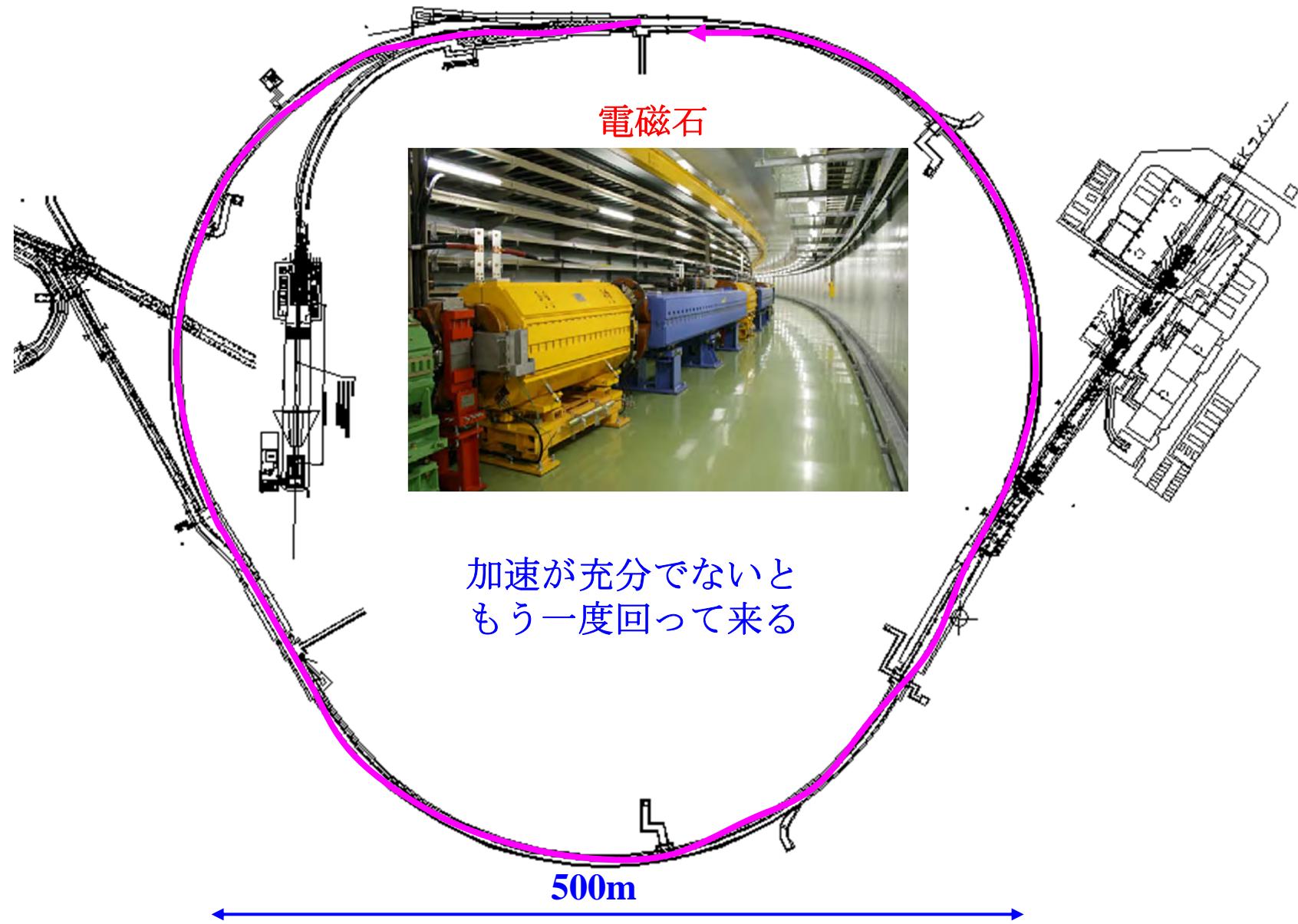
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



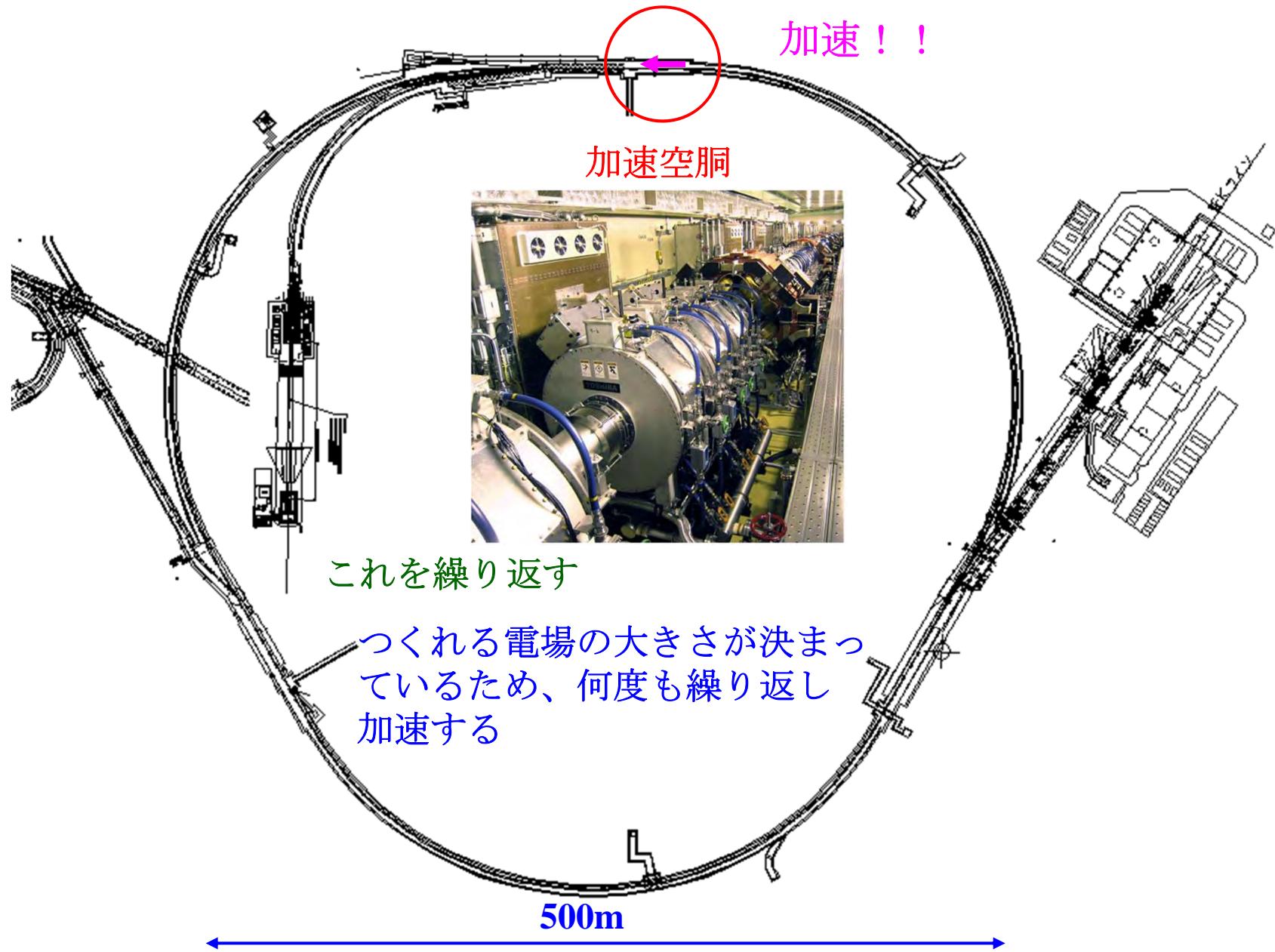
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）

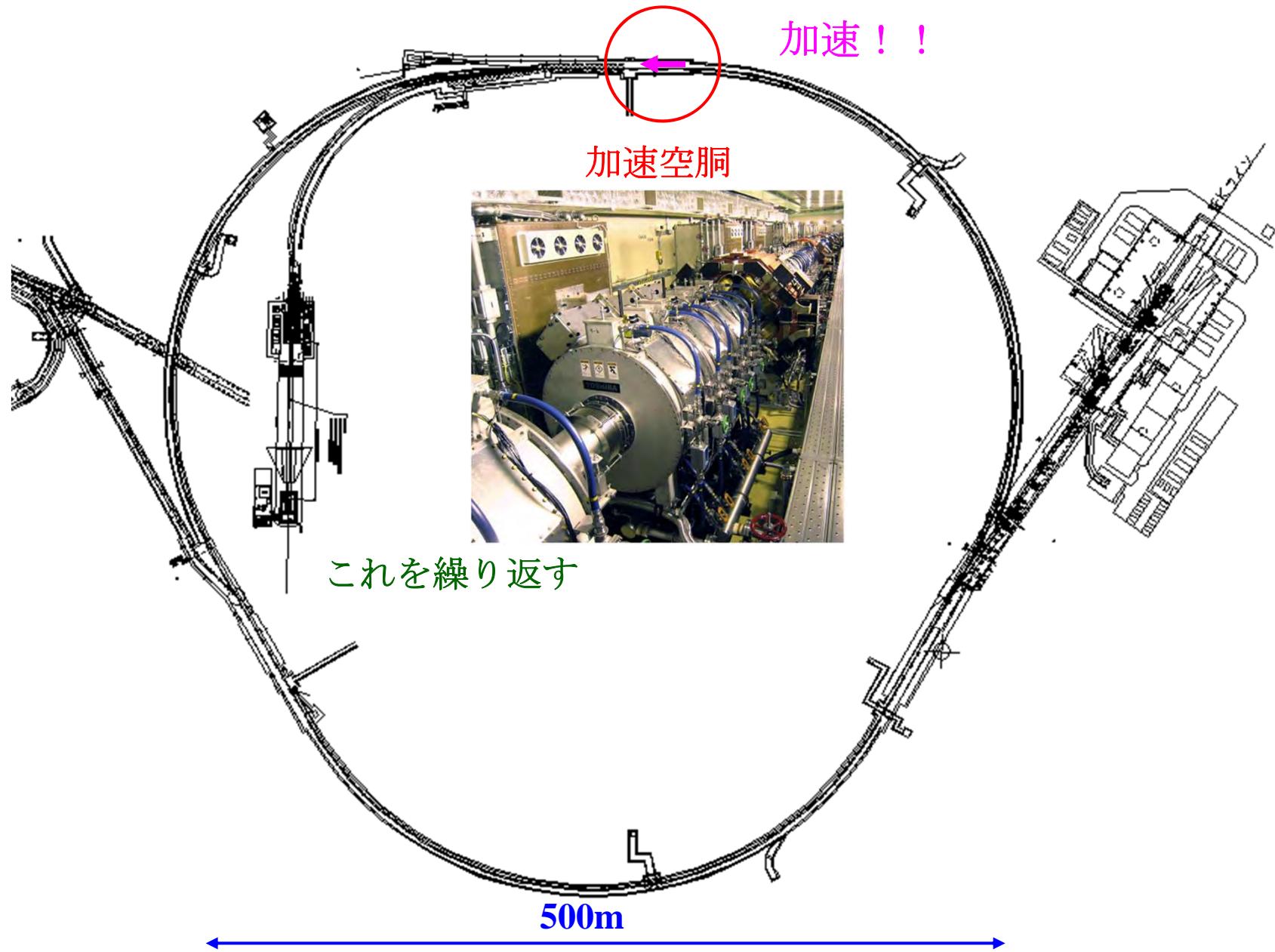


あれ？

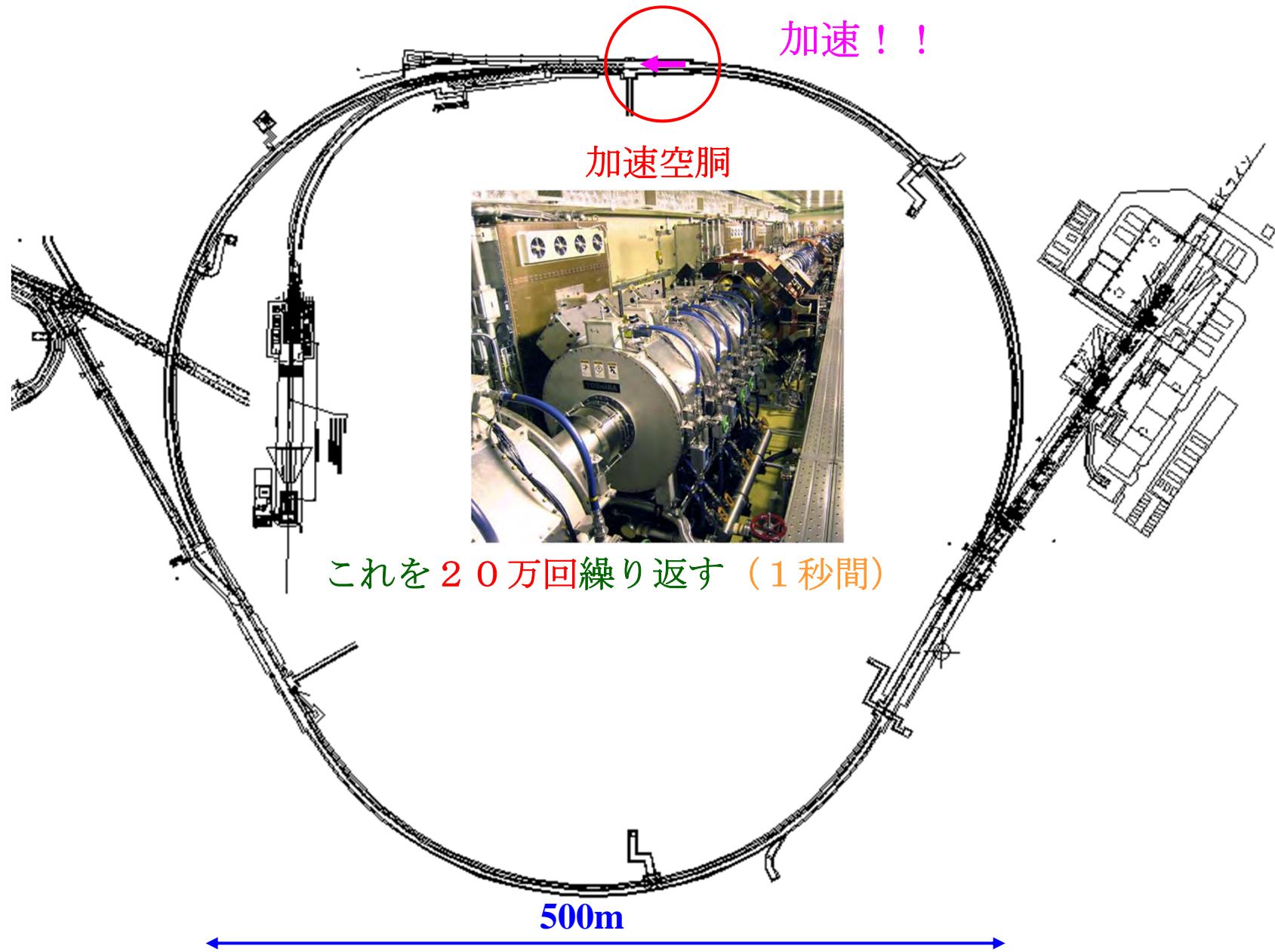
あれ？

これって、ほとんど加速していないんじゃあ、、

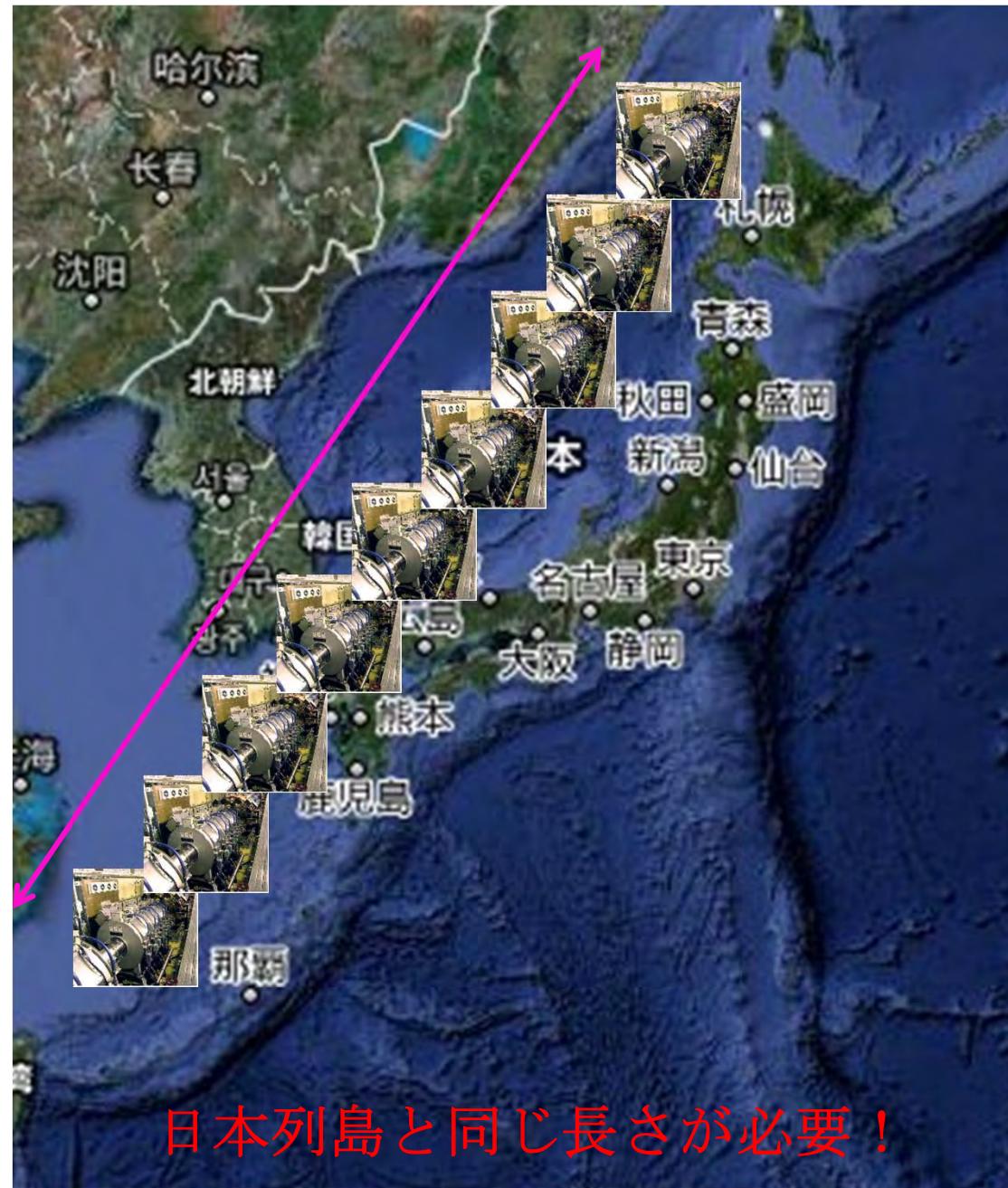
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



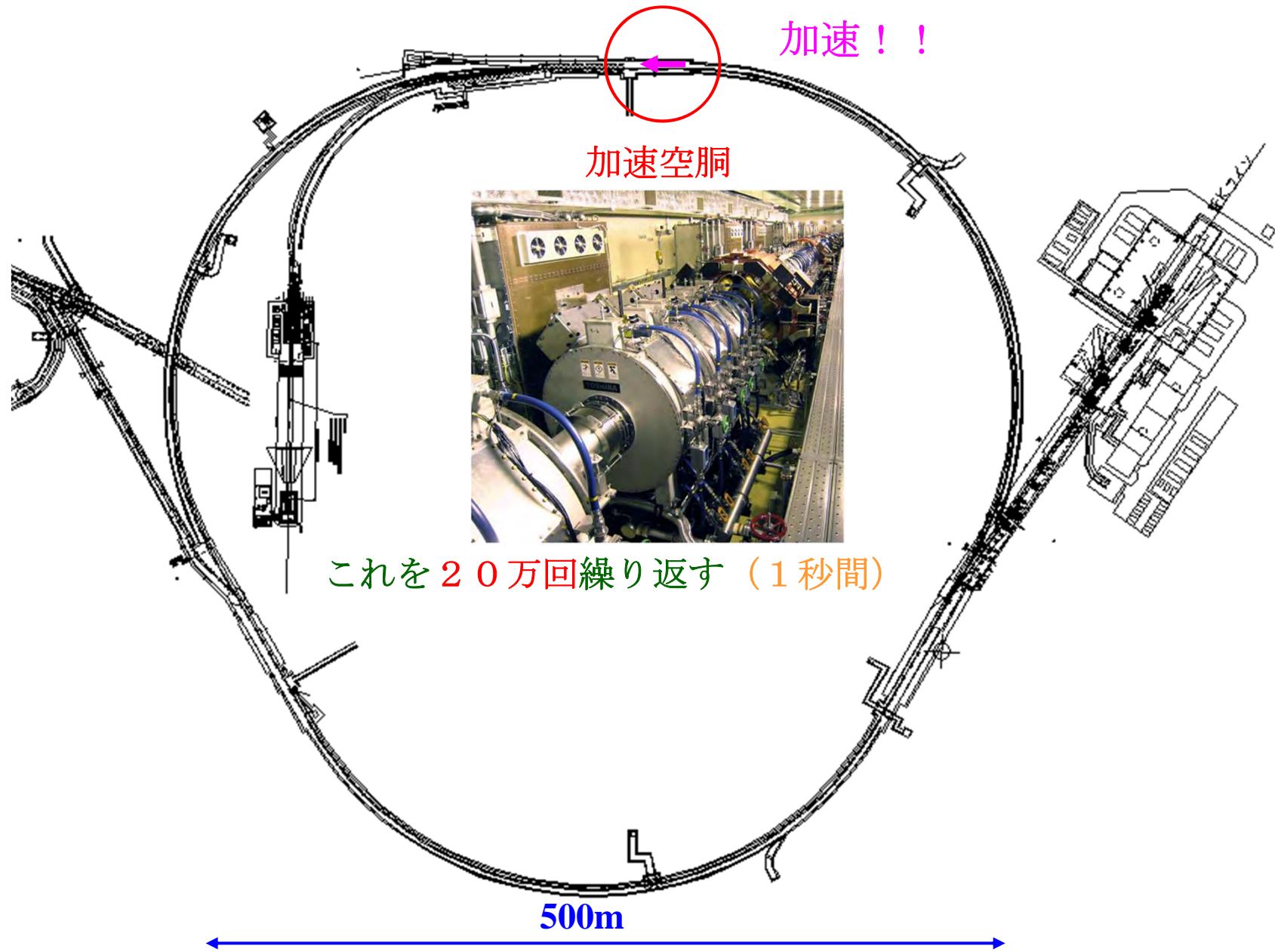
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）

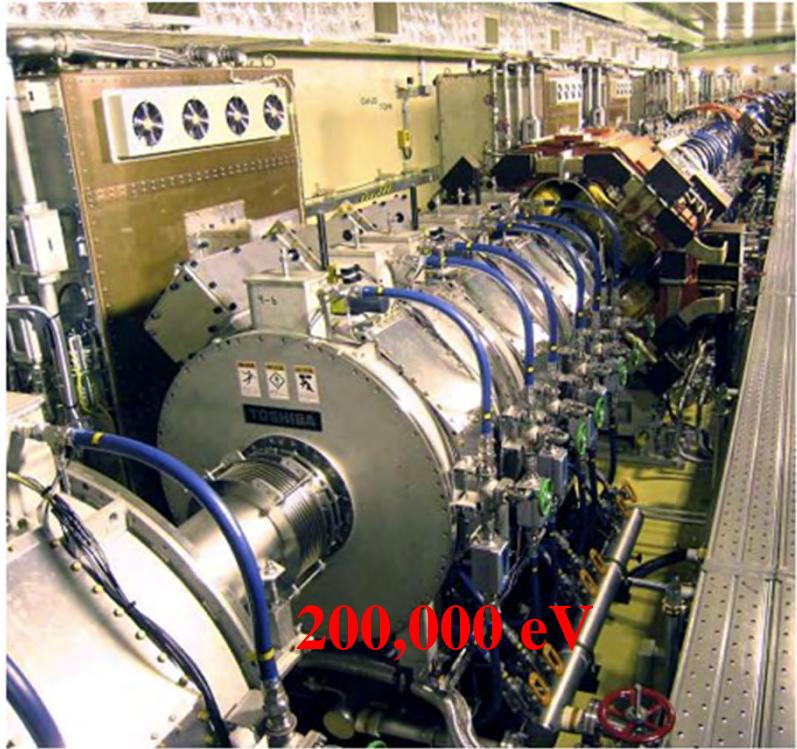


もし加速空洞だけだったら、、



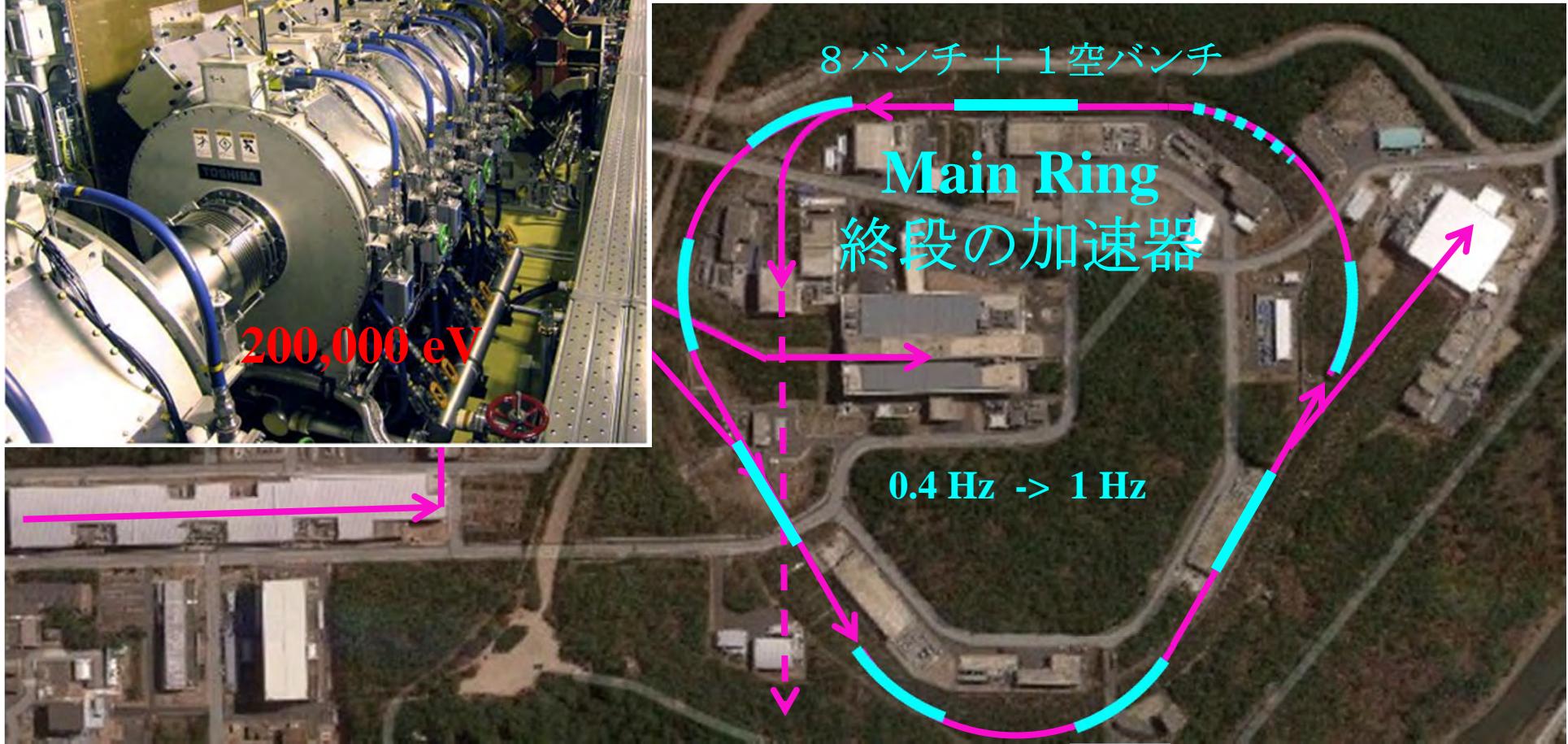
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



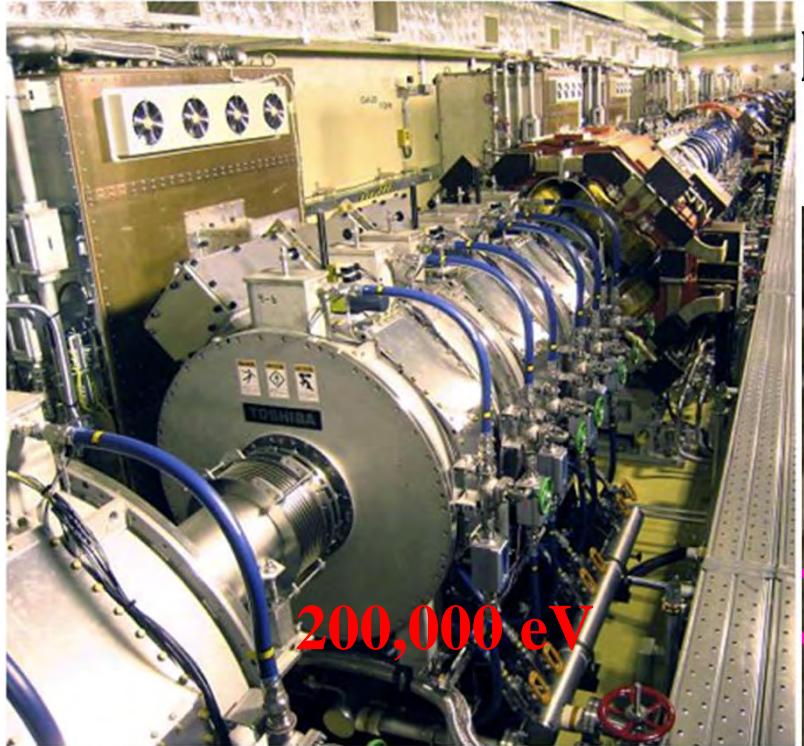


Main Ring

30,000,000,000 eV

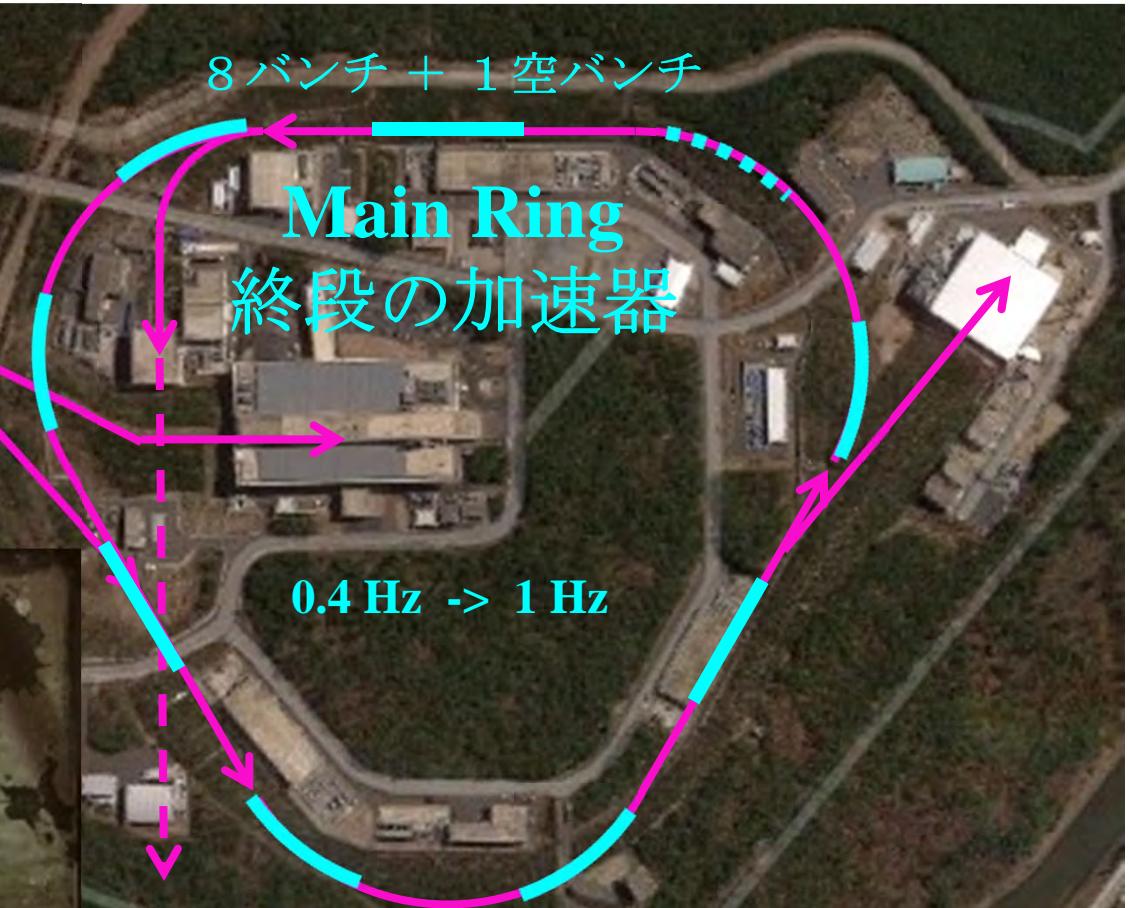


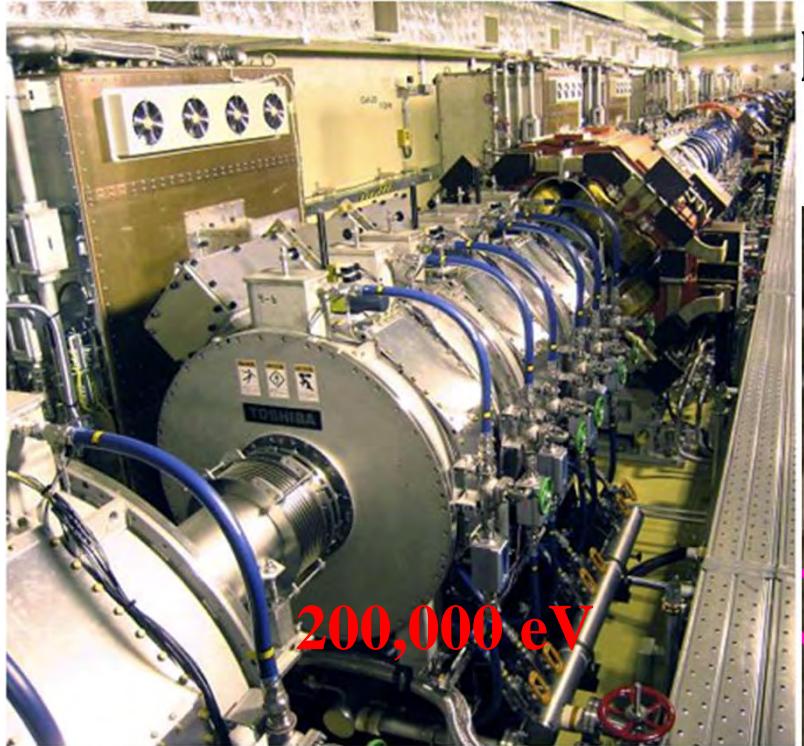
加速空洞



Main Ring

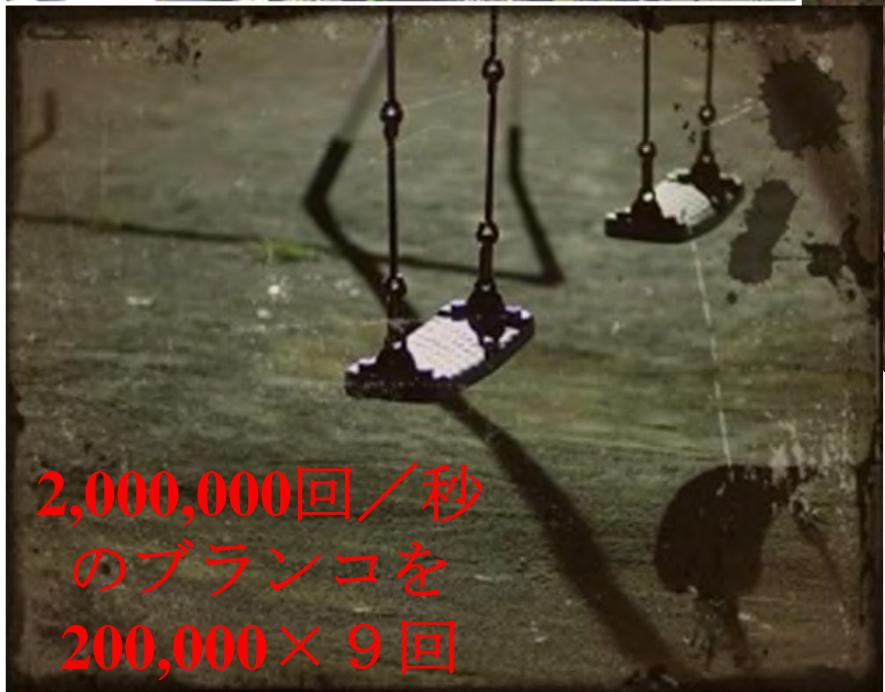
30,000,000,000 eV





Main Ring

30,000,000,000 eV

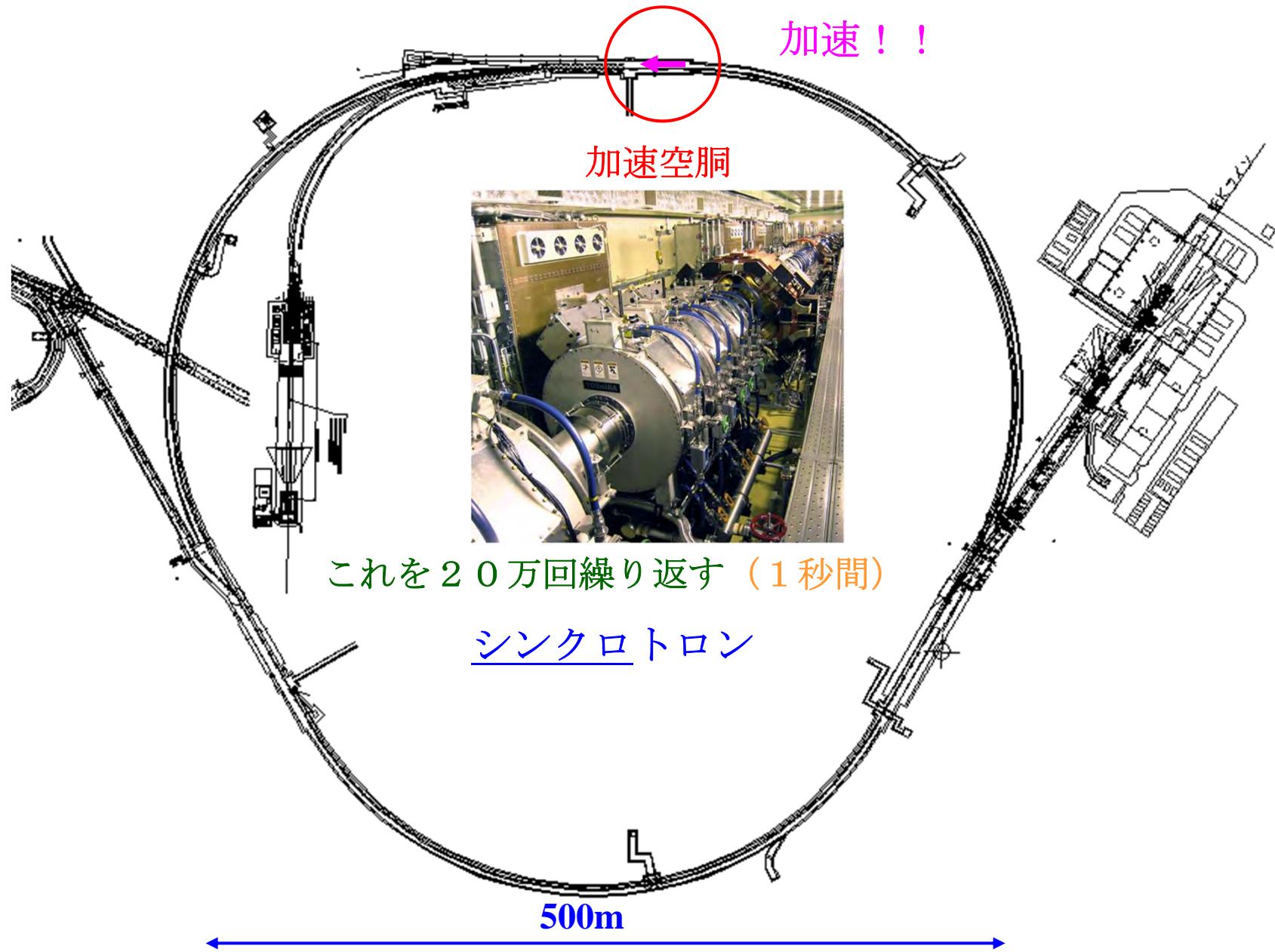


2,000,000回／秒
のブランコを
 $200,000 \times 9$ 回

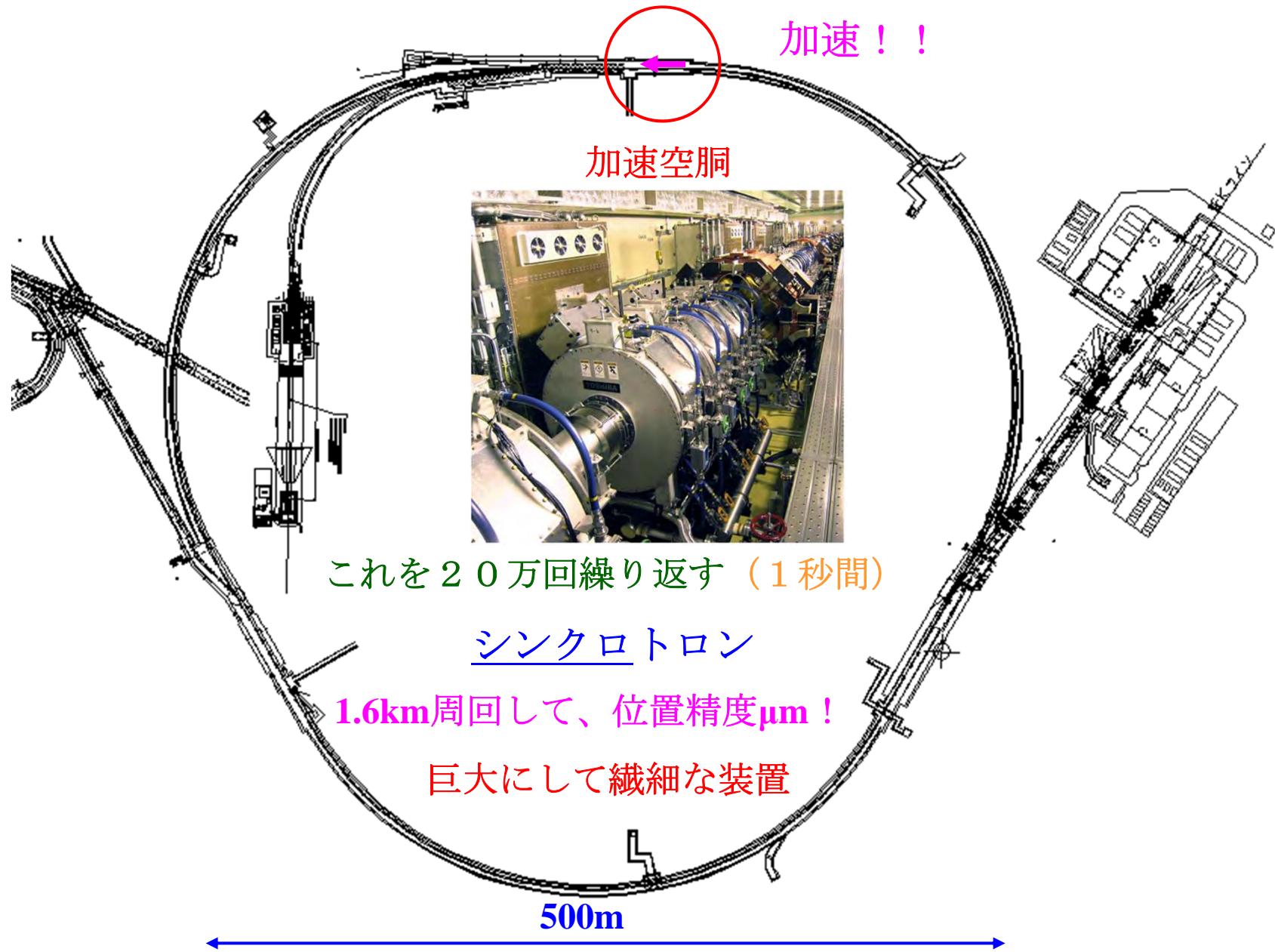


加速空洞

加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）

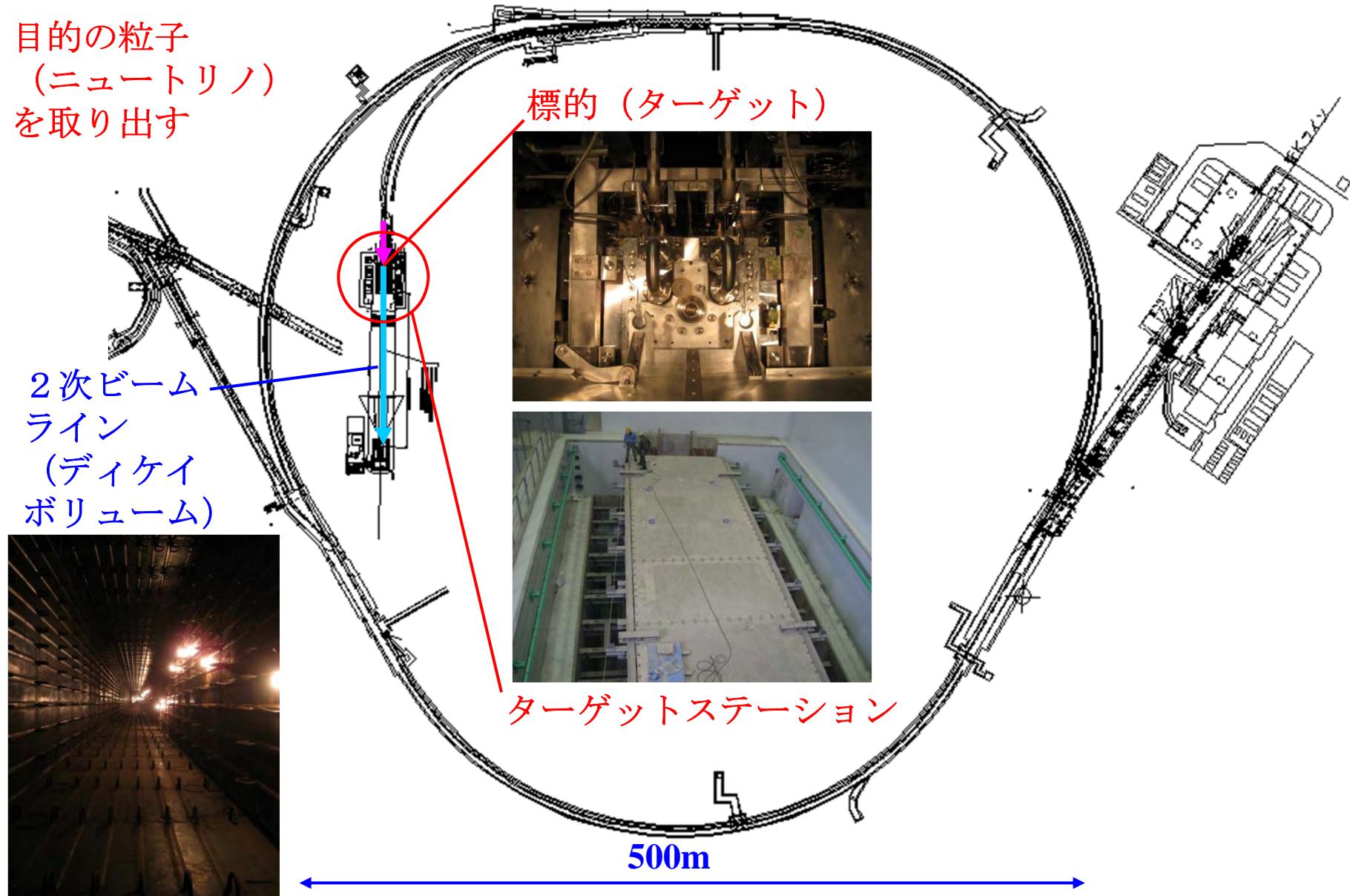


ニュートリノビームライン
の電磁石（超伝導電磁石）



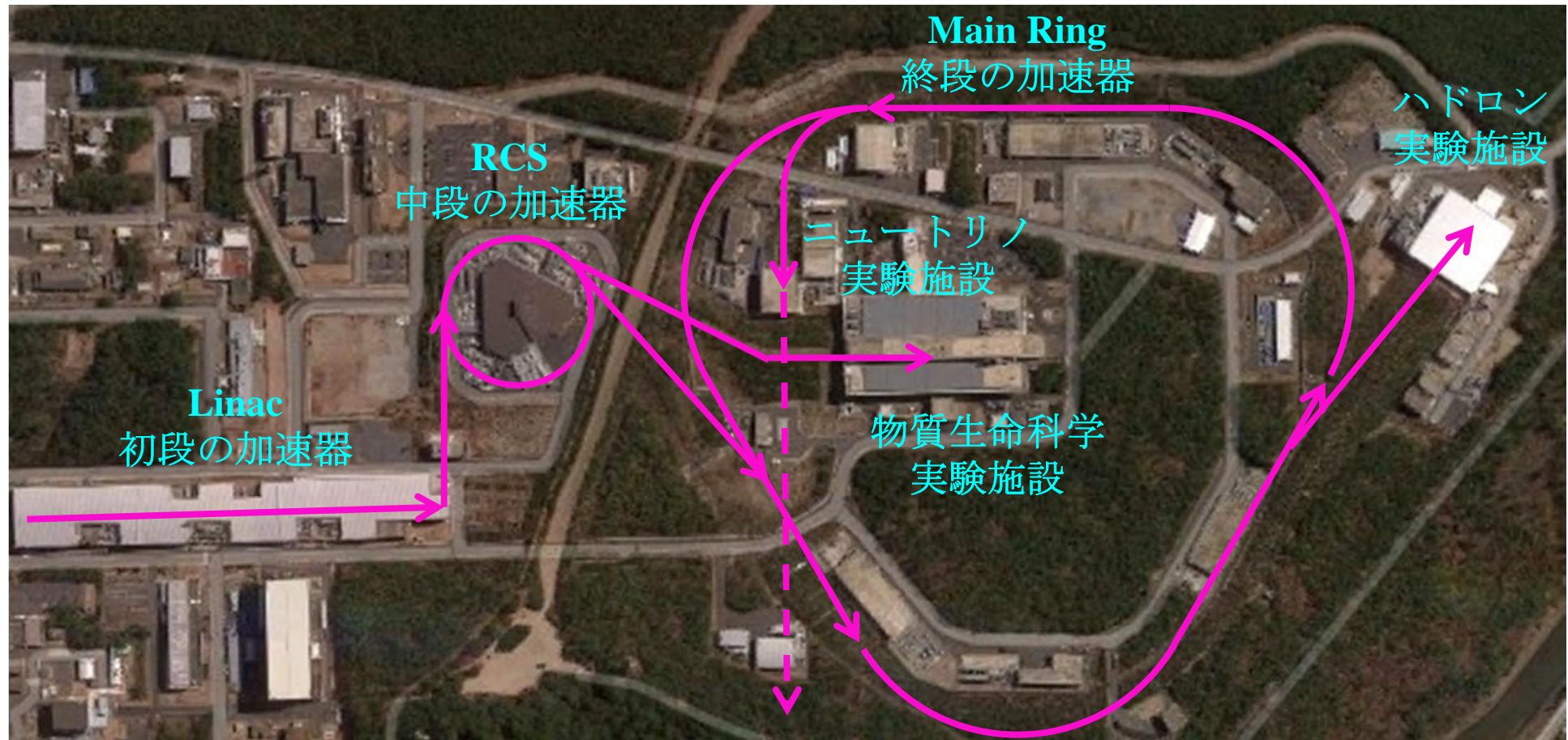
500m

加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



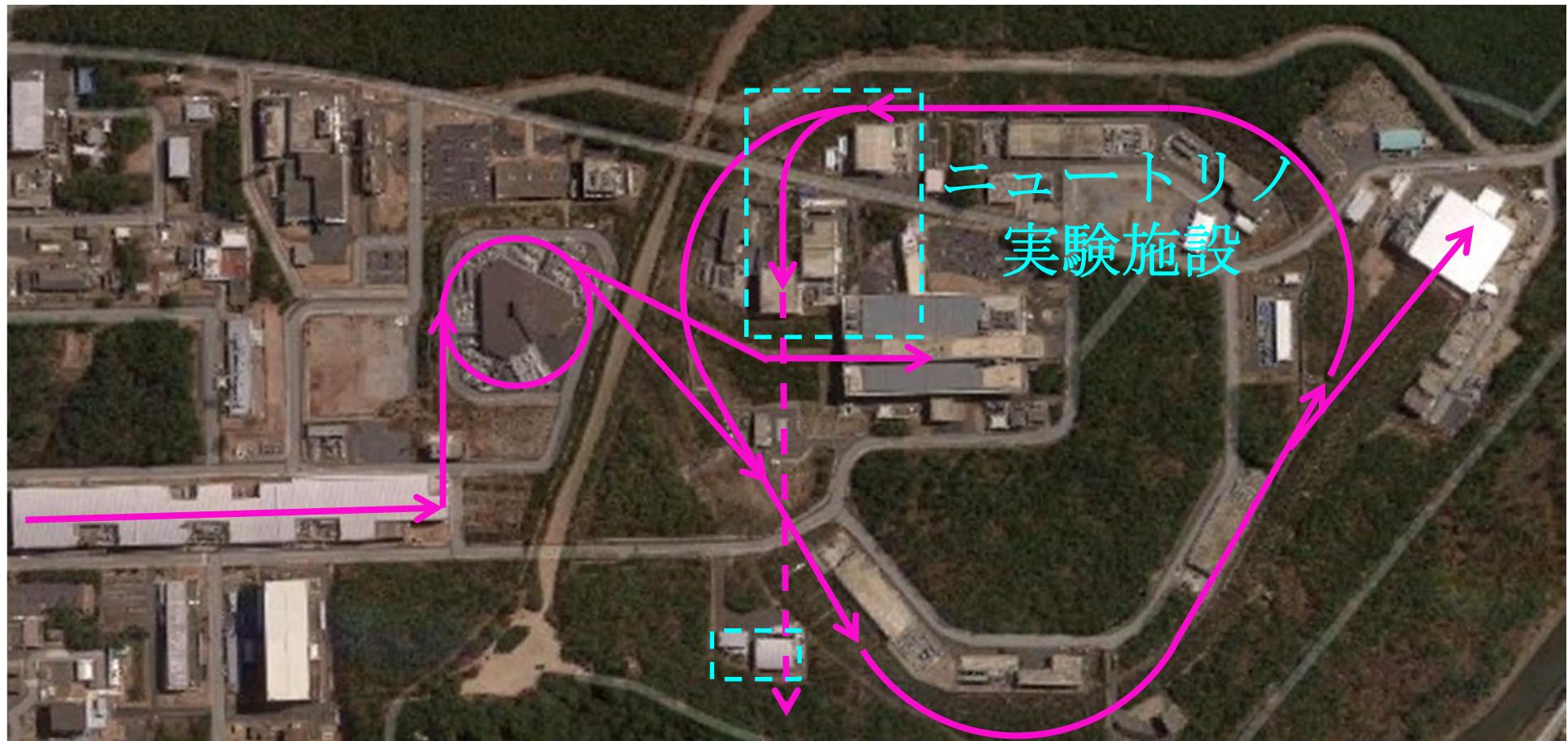
J-PARC

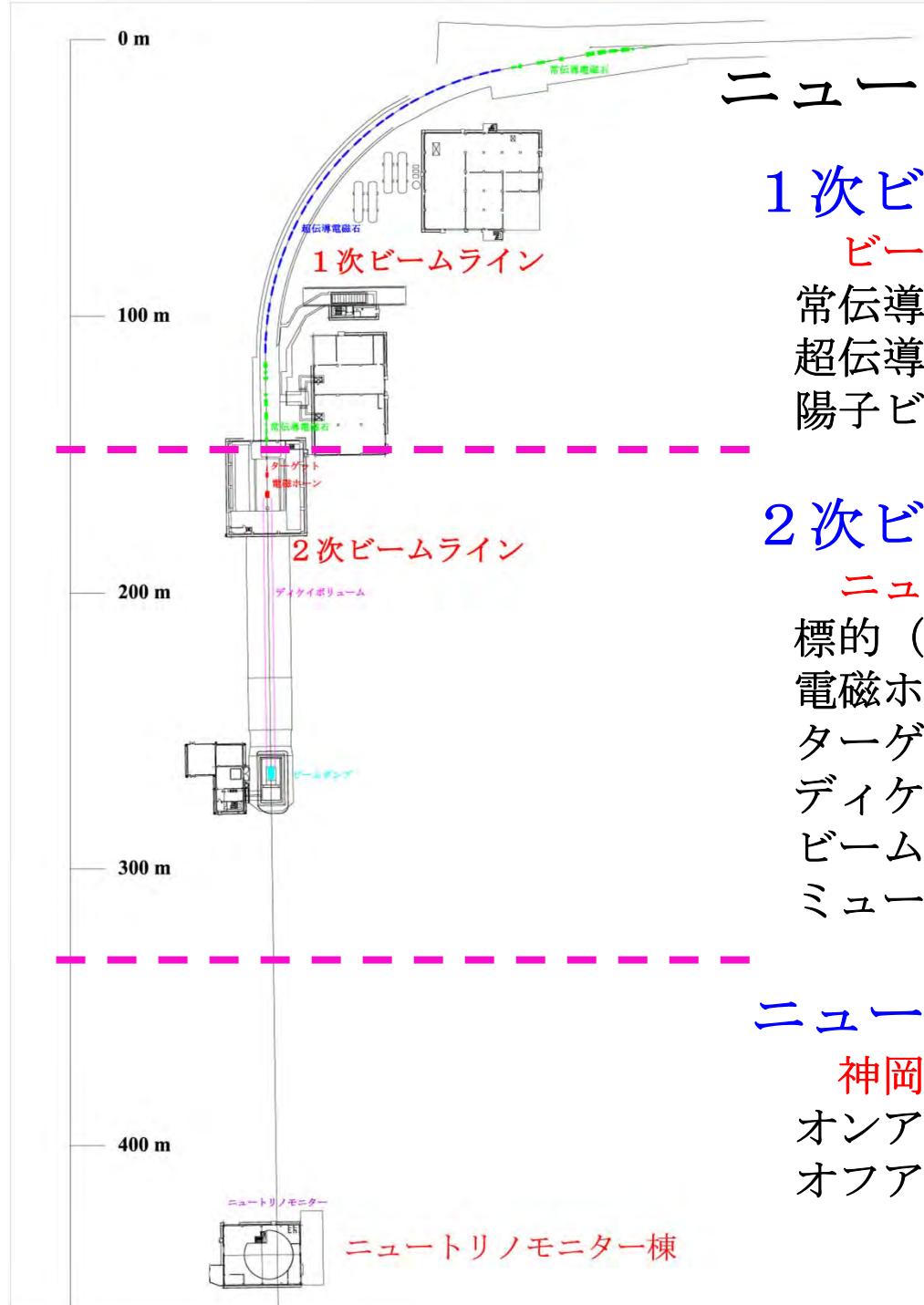
日本が誇る世界最高強度の加速器



Japan Proton Accelerator Research Complex
標的が複数ある複合実験施設

ニュートリノ実験施設





ニュートリノビームラインの構成

1次ビームライン

ビームを神岡に向ける

常伝導電磁石
超伝導電磁石
陽子ビームモニター

2次ビームライン

ニュートリノを生成する

標的 (ターゲット)
電磁ホーン
ターゲットステーション
ディケイボリューム
ビームダンプ
ミューオンモニター

ニュートリノモニター

神岡に飛ぶ前のニュートリノを調べる

オンアクシスモニター
オフアクシスモニター

1次ビームライン

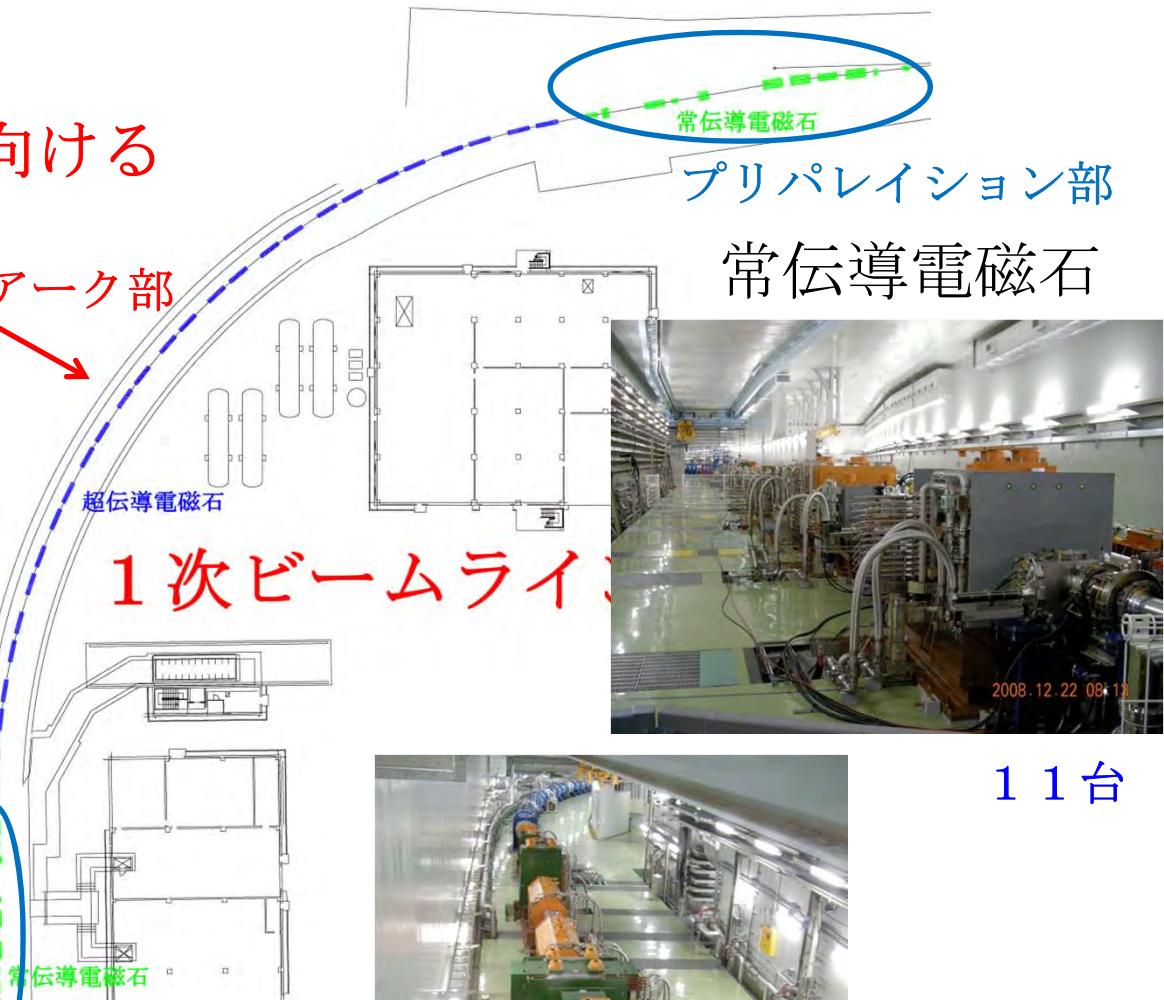
ビームを神岡の方向に向ける

超伝導電磁石



28台（14対）

断面



11台



12台



ファイナル
フォーカス部

超伝導電磁石システム

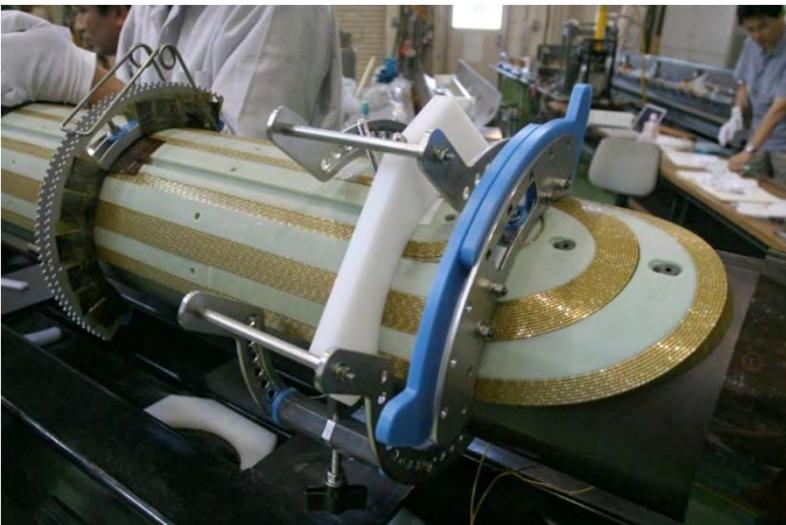
設置された超伝導電磁石



冷凍機（地上）



内部のコイル (NbTi)



Combined Function Magnet

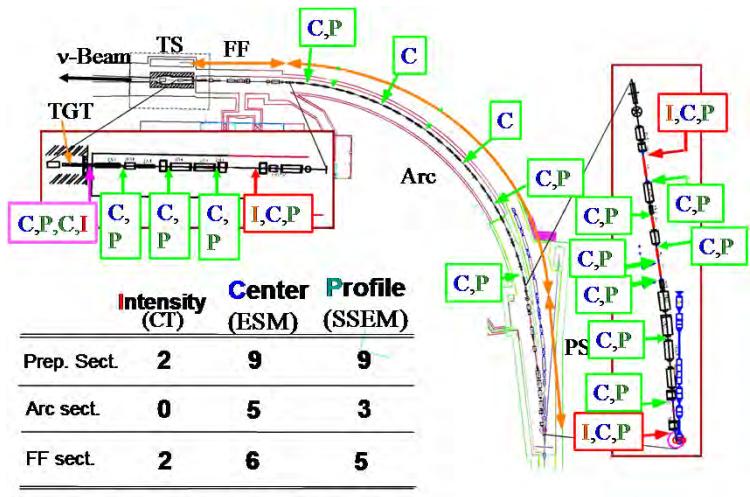
電流 : 4400 A @ 30 GeV

7435 A @ 50 GeV

Dipole 磁場 : 2.6 T

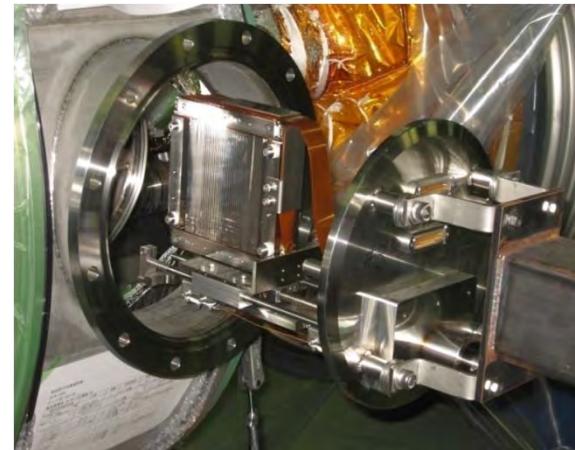
Quadrupole 磁場 : 1.86 T / m

陽子ビームモニター



ビームの状態を監視する

ビームの形を見る : SSEM



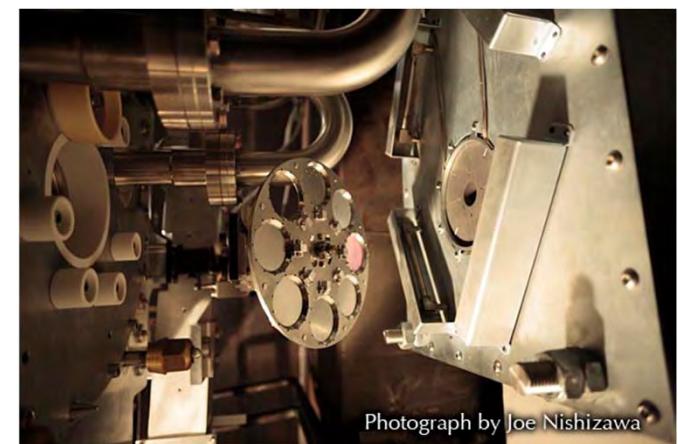
ビームの強さを見る : CT



ビームの位置を見る : ESM



ビームの位置を見る : OTR



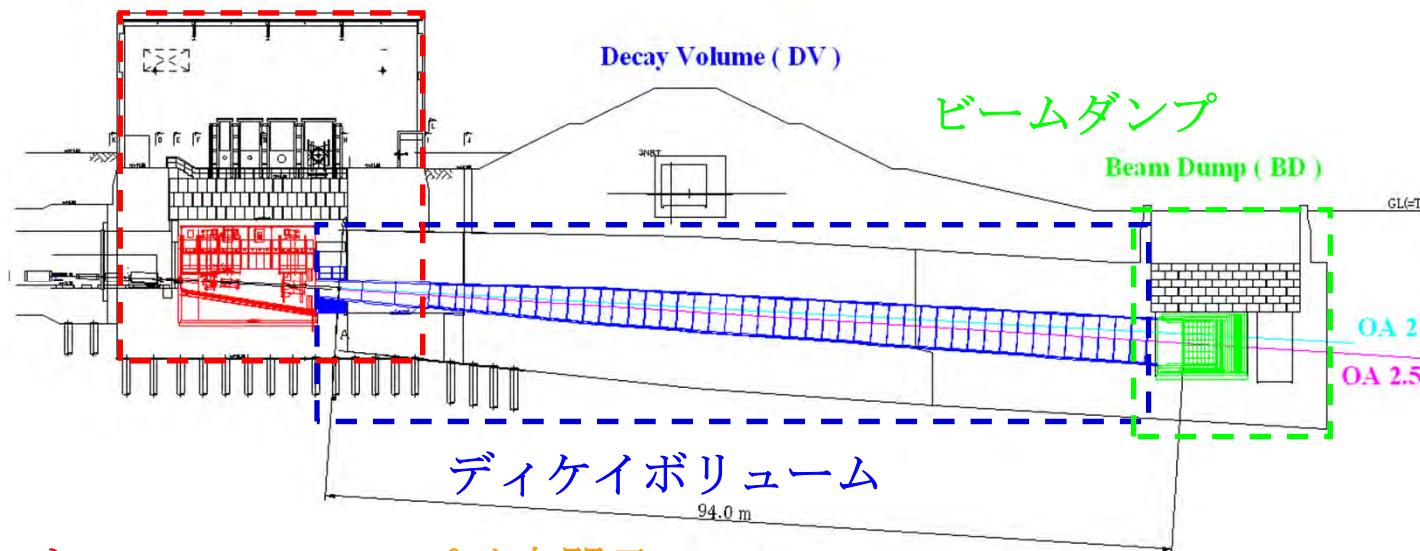
2次ビームライン

ニュートリノをつくり出す

世界で唯一、向きを変えられるニュートリノビーム砲

ターゲットステーション

Target Station (TS)



ターゲット

パイ中間子

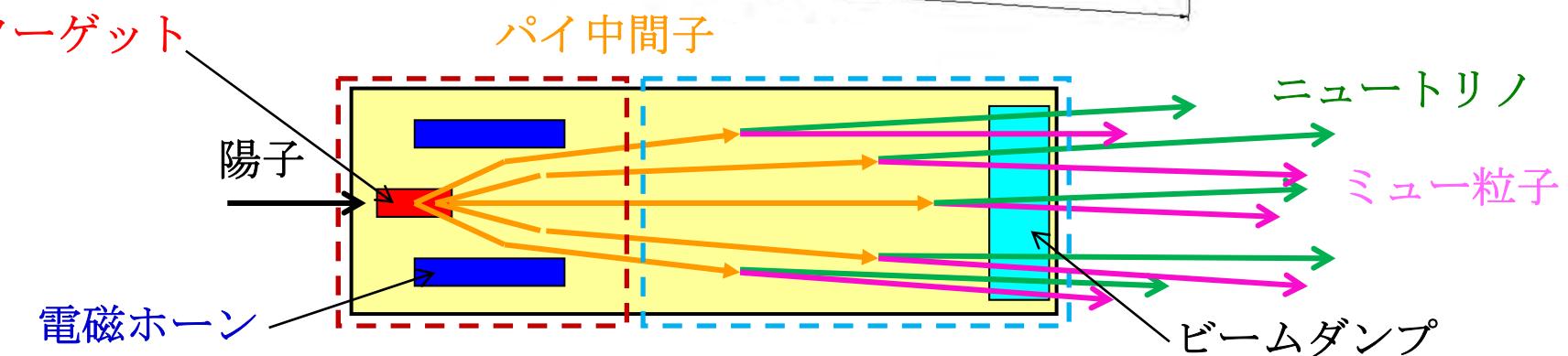
陽子

電磁ホーン

ニュートリノ

ミュー粒子

ビームダンプ



ターゲットステーション ニュートリノビームラインの心臓部

上部コンクリート
遮蔽体 (3,400t)



ヘリウム容器
(構造体)



天井クレーン
(遠隔操作式)



外部鉄遮蔽体 (2,400t)

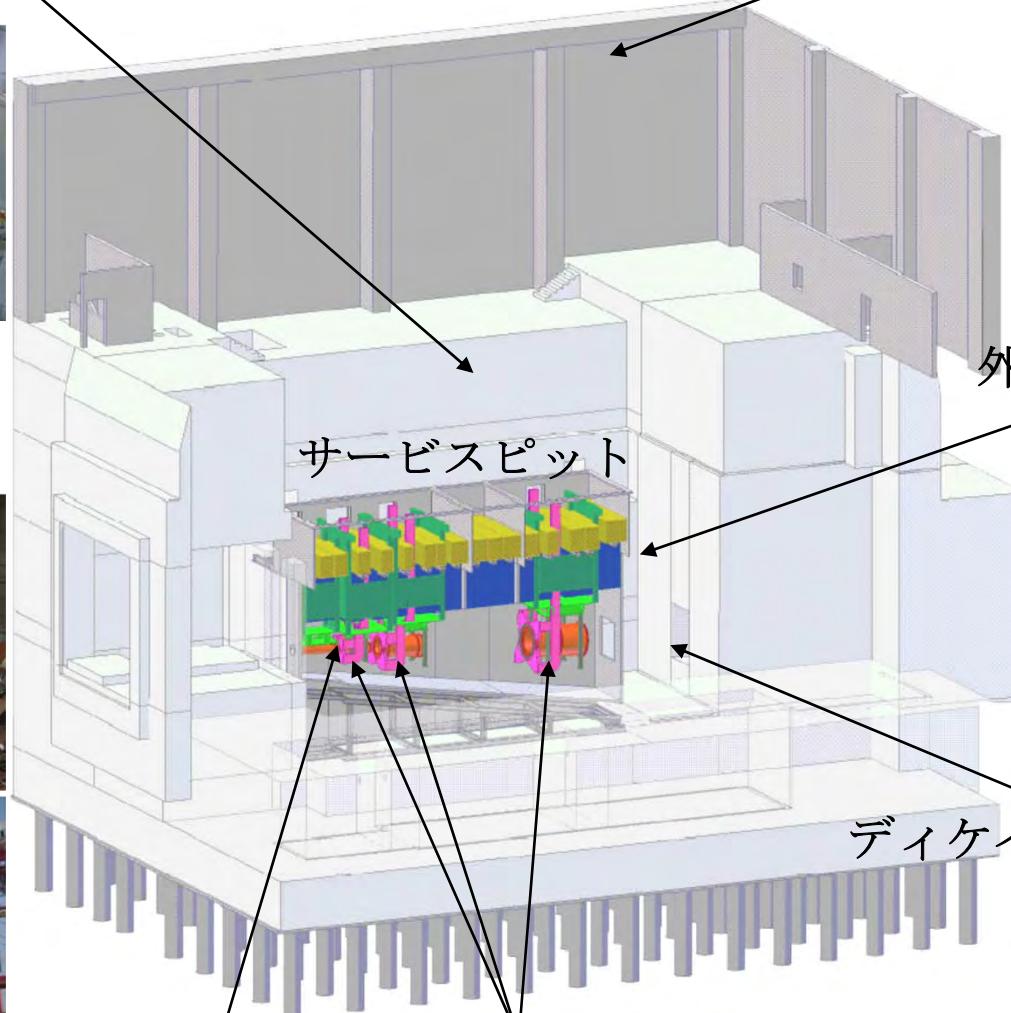


ディケイボリューム最上流部

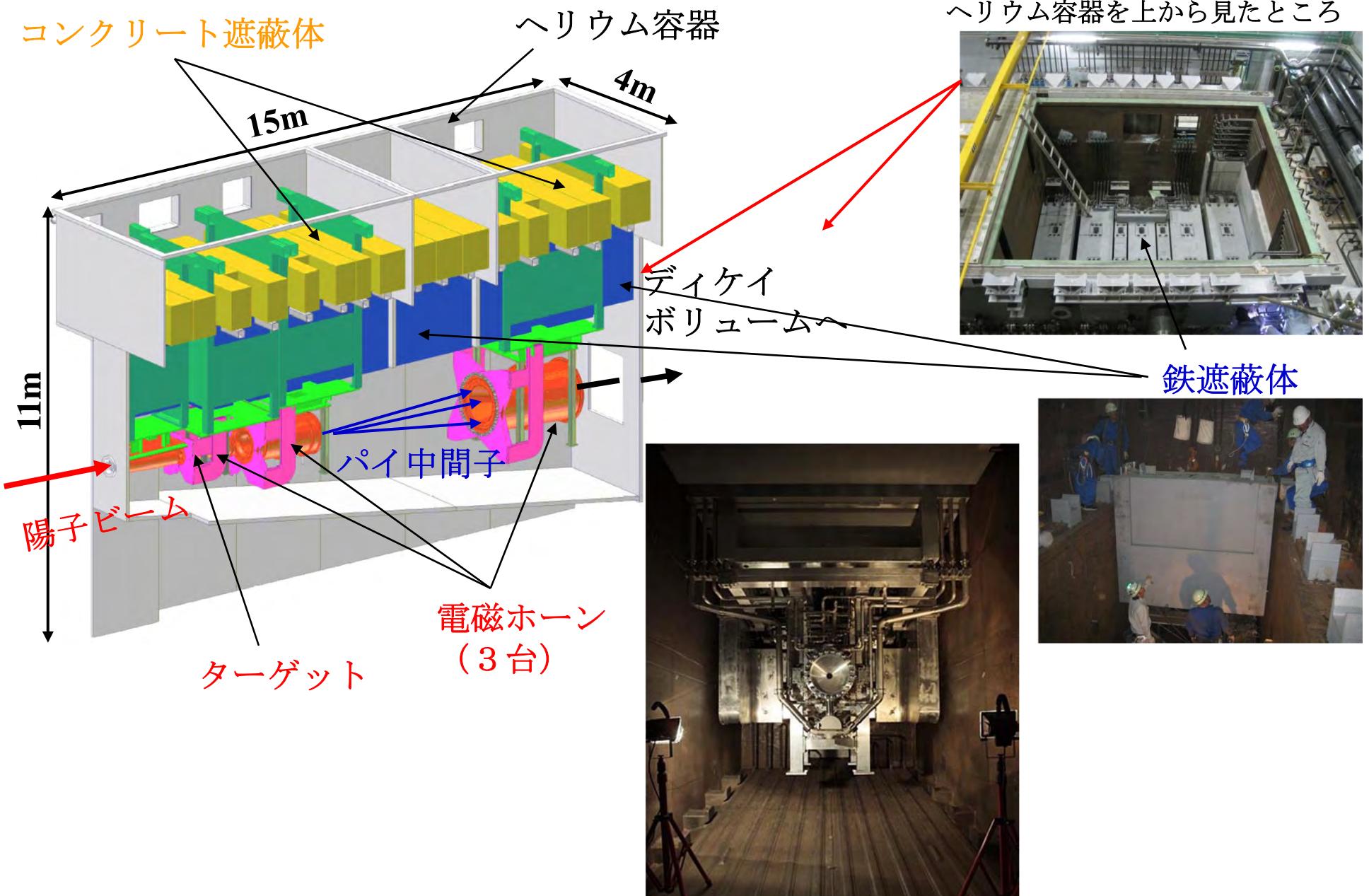


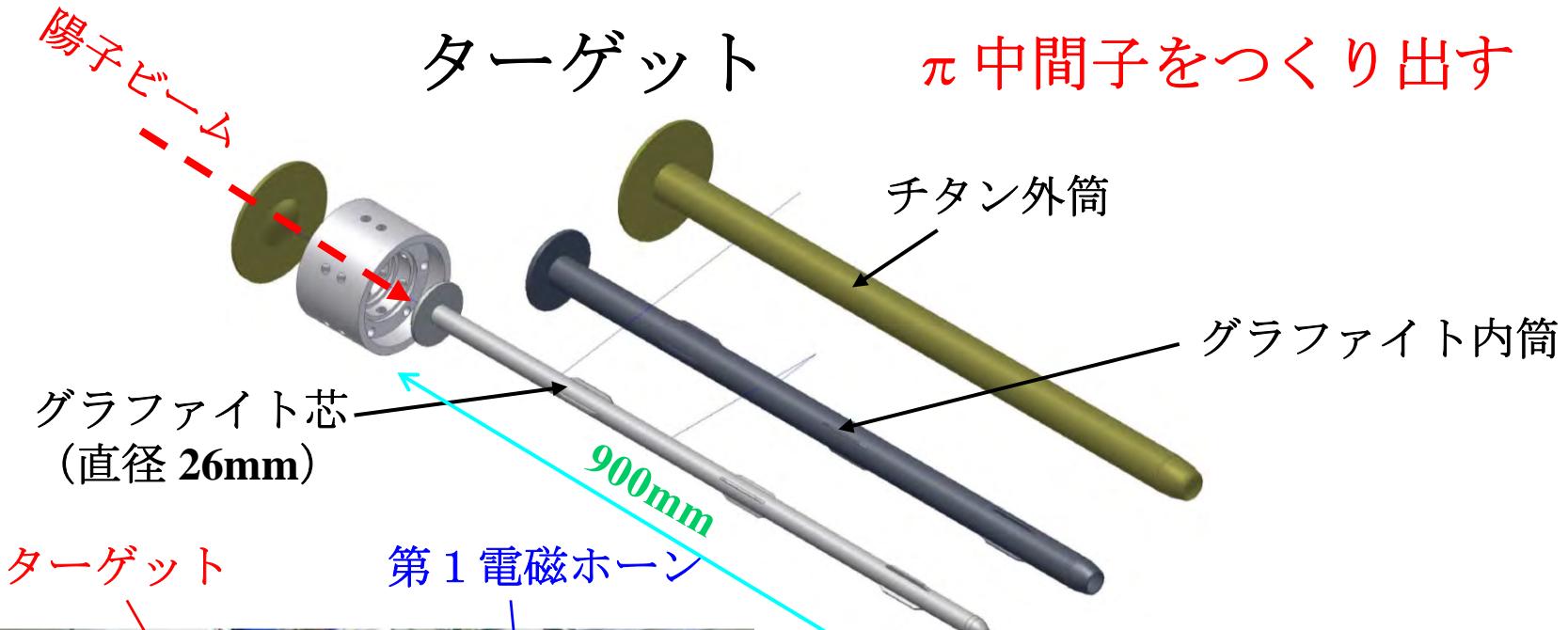
ターゲット

電磁ホーン

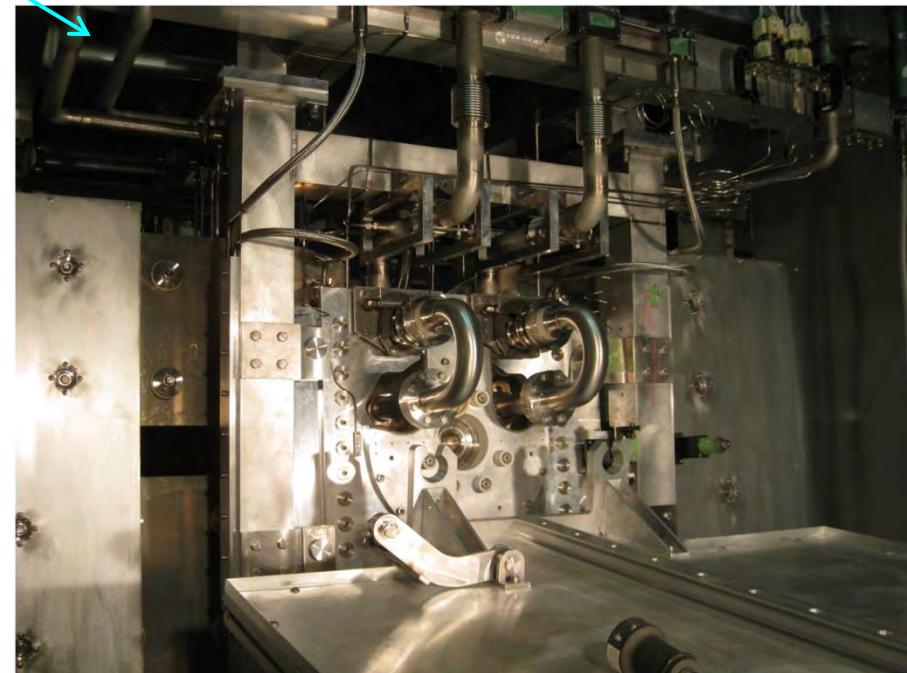


ターゲットステーション（ヘリウム容器の内側）



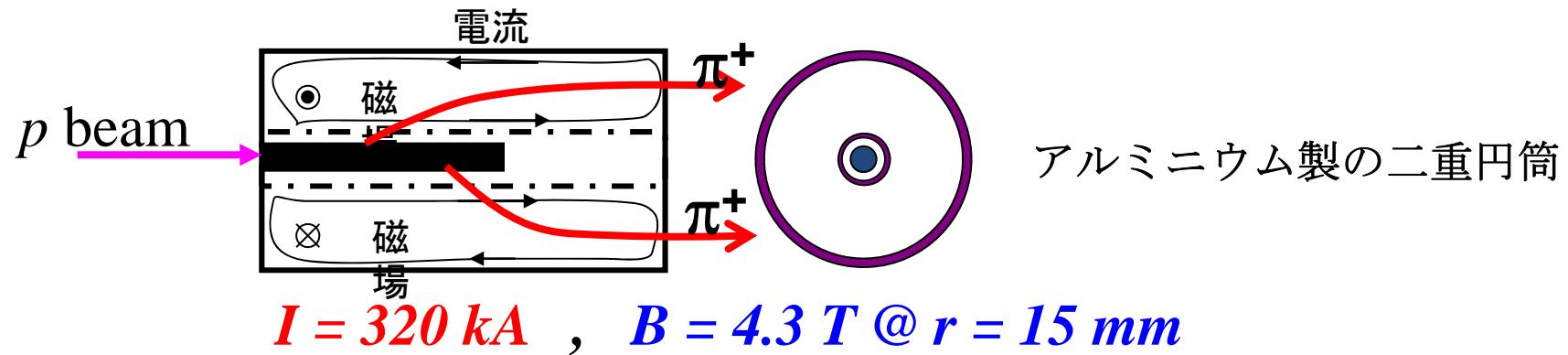


第1電磁ホーンに挿入・固定する

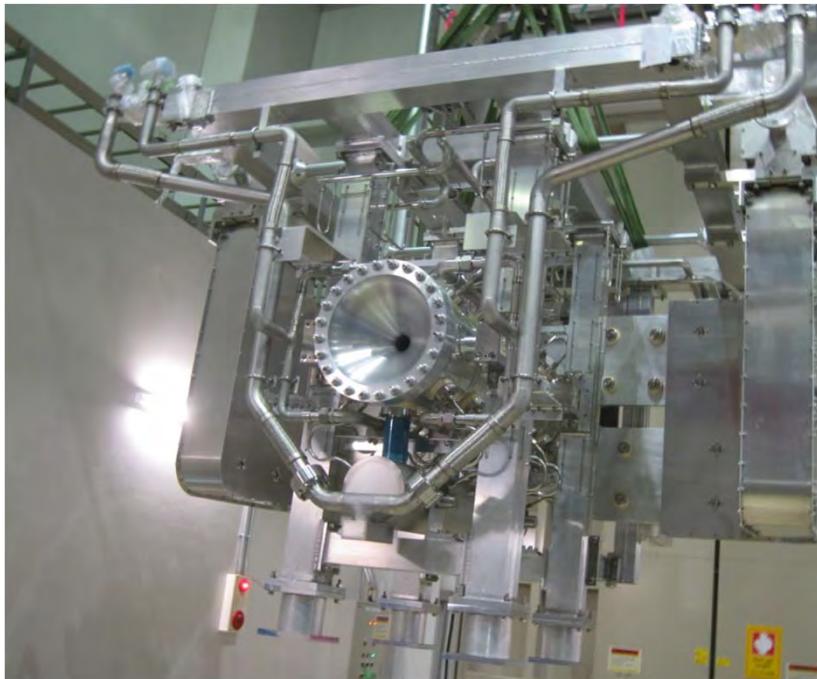


電磁ホーン

π 中間子をビーム状に絞るニュートリノビーム砲のエンジン



第1電磁ホーン



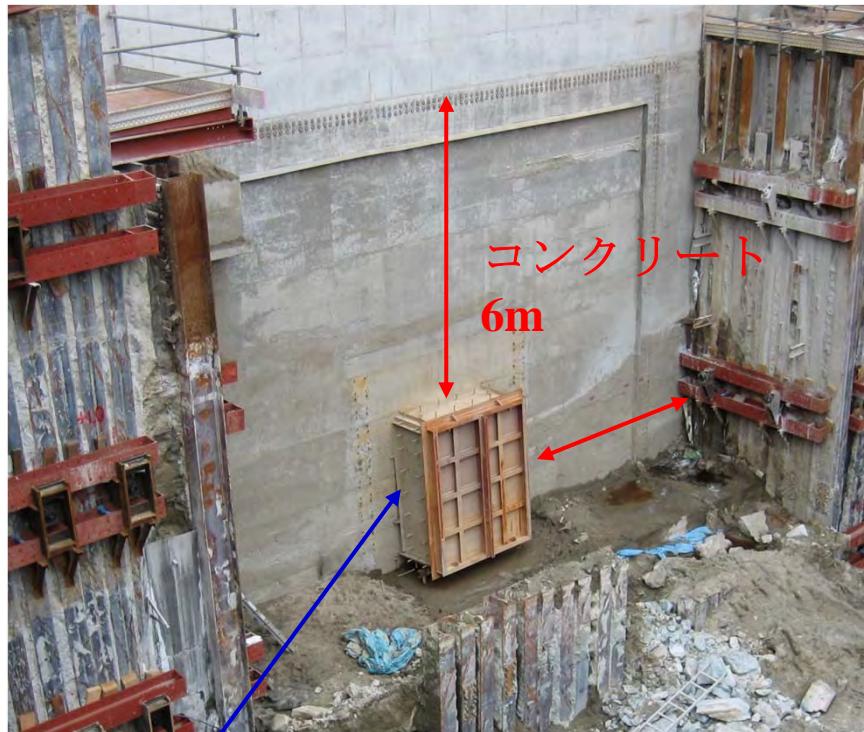
第3電磁ホーン



ディケイボリューム

π中間子からニュートリノをつくるニュートリノビーム砲の砲身

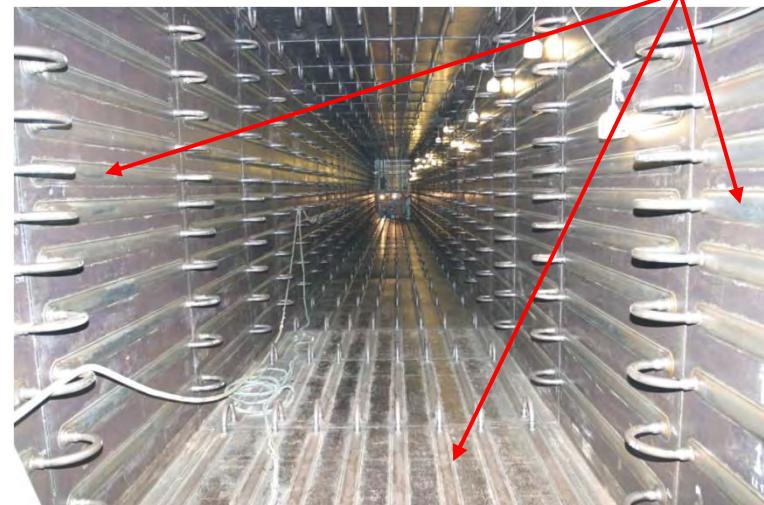
16mm鉄板+6mコンクリート



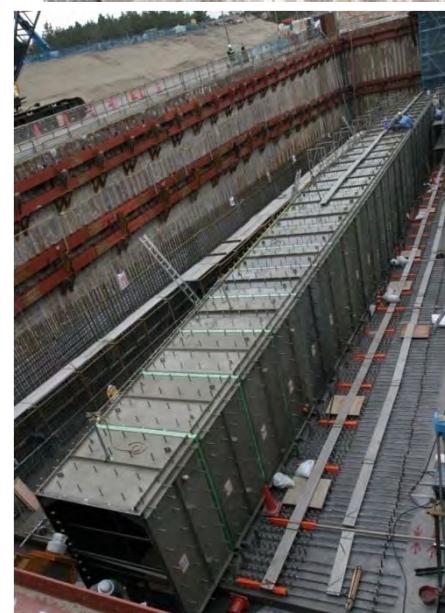
16mm
鉄板の箱

このコンクリート構造物
そのものが実験装置である！

鉄板内部



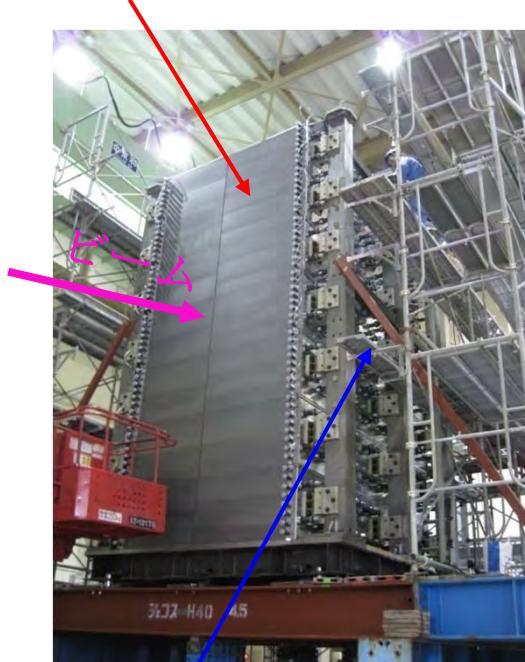
鉄板外観



ビームダンプ

ニュートリノだけを選別するフィルター

ハドロン吸収体とそれを収めるヘリウム容器、並びにその周囲の遮蔽体から構成される
グラファイト



モジュール



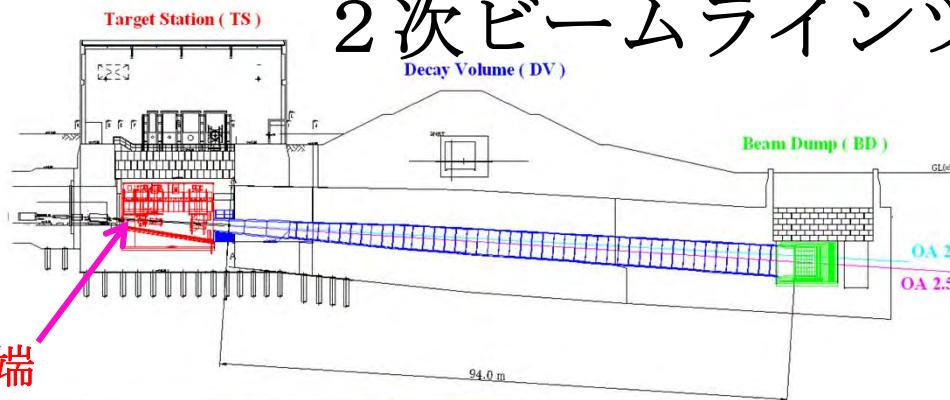
設置状態 (DV終端部)



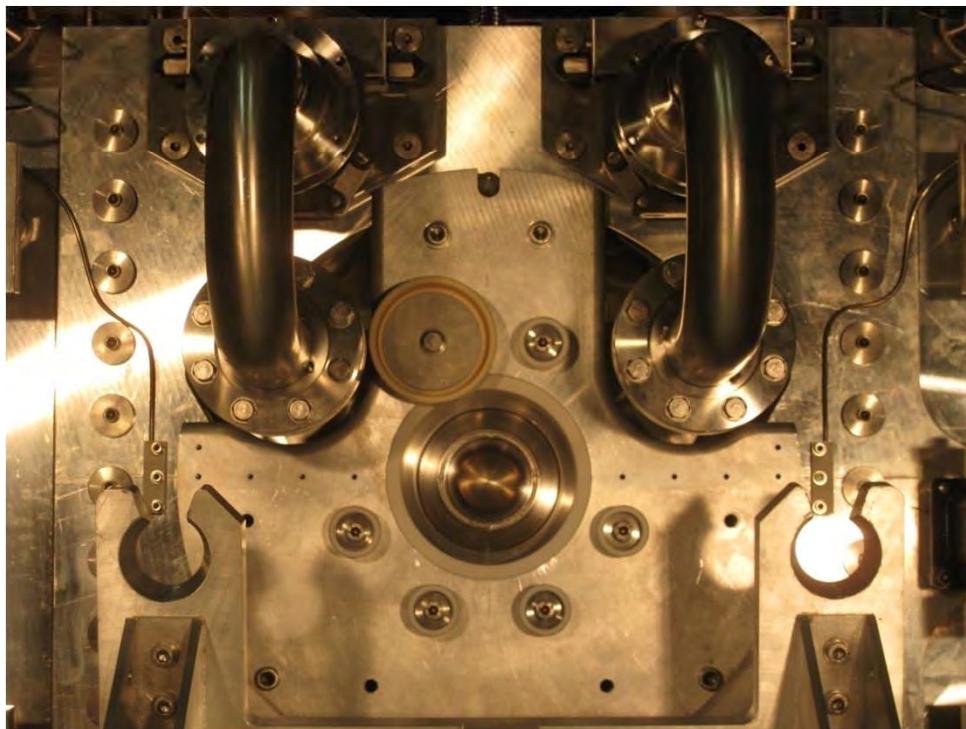
設置の様子 (2008.10.18)



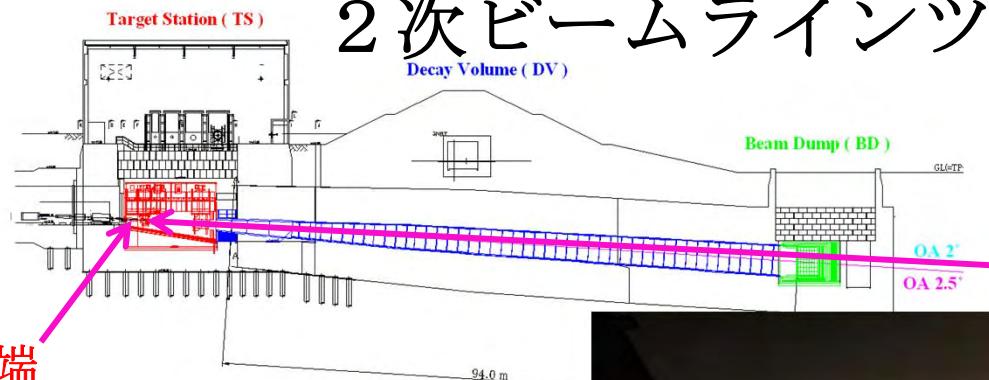
2次ビームラインツアー



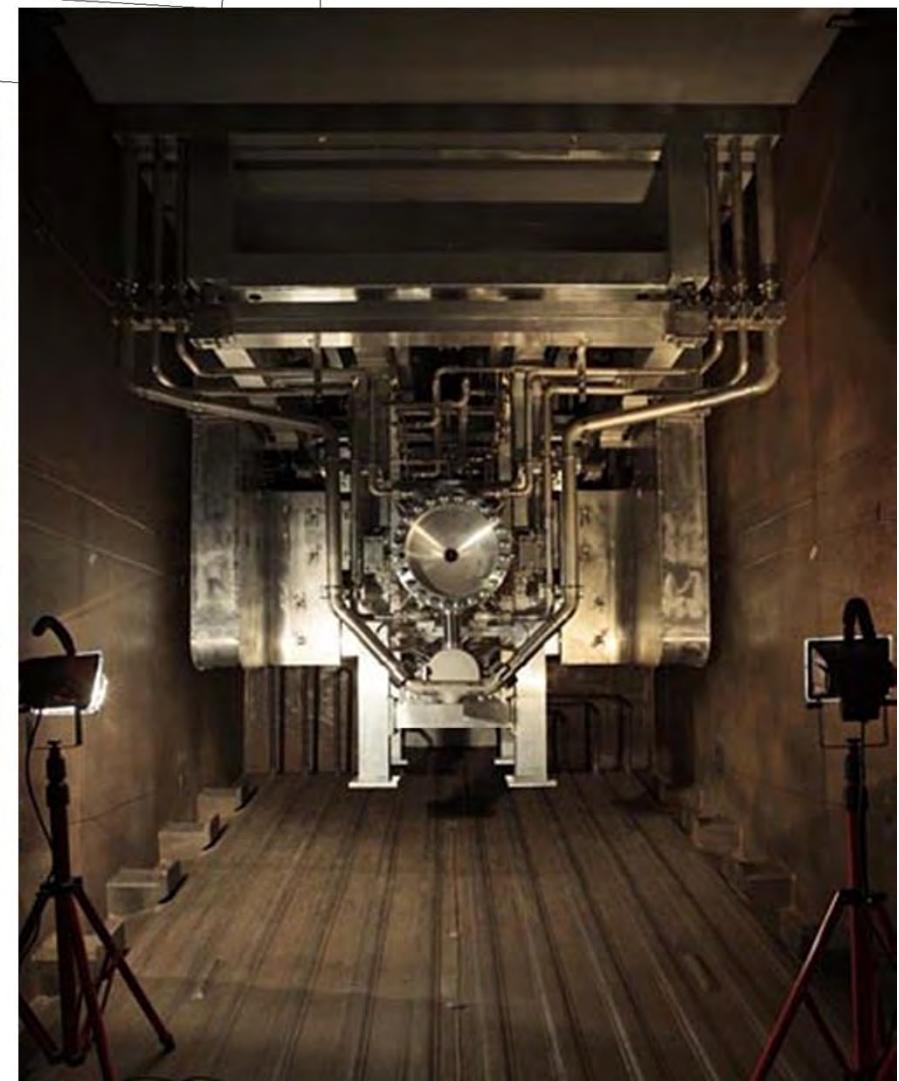
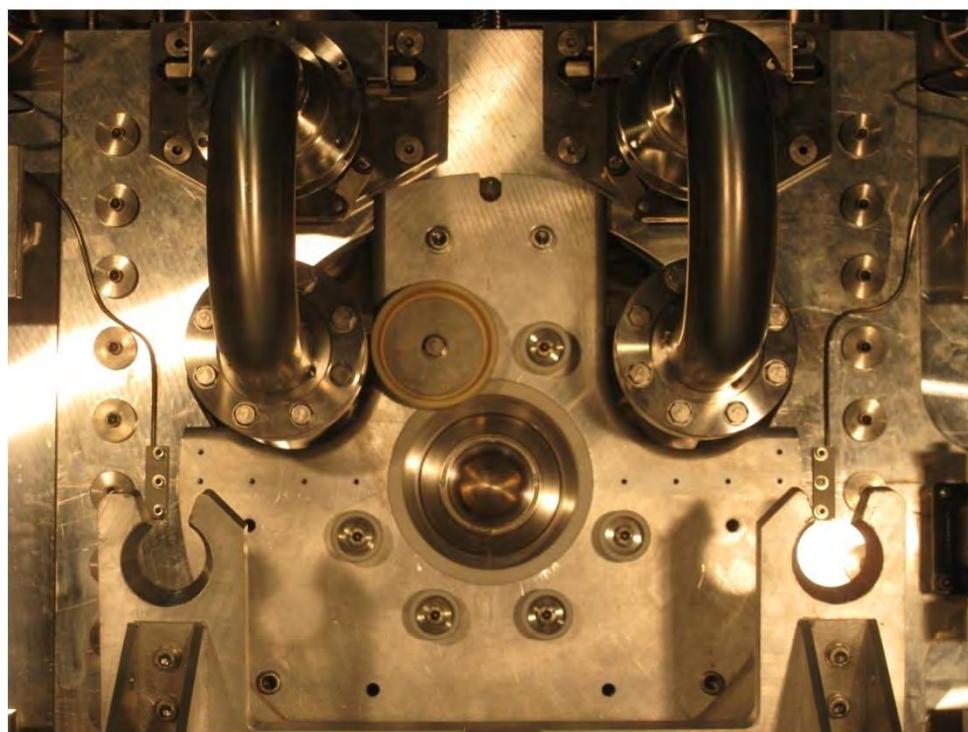
ターゲット上流端



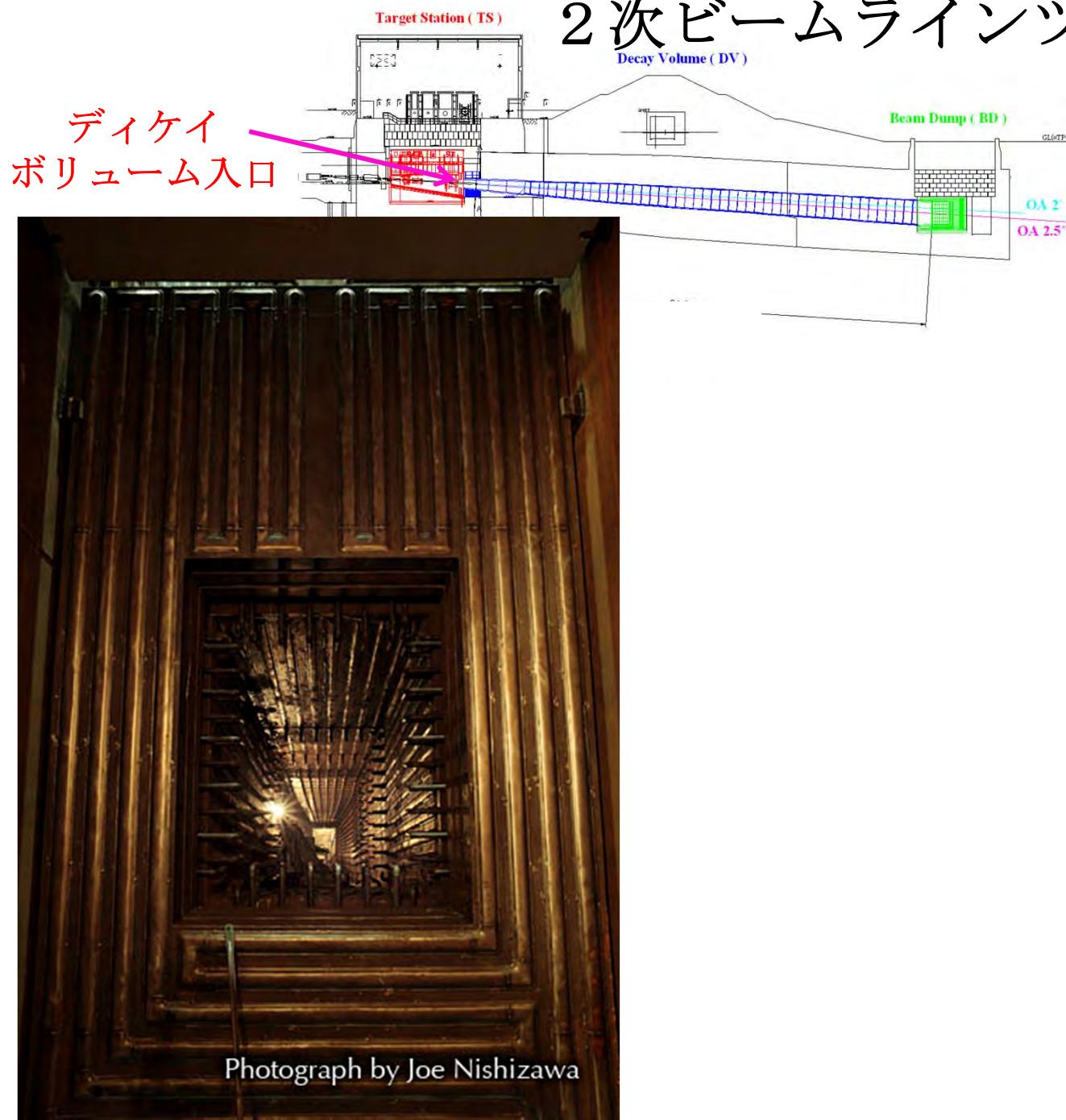
2次ビームラインツアー



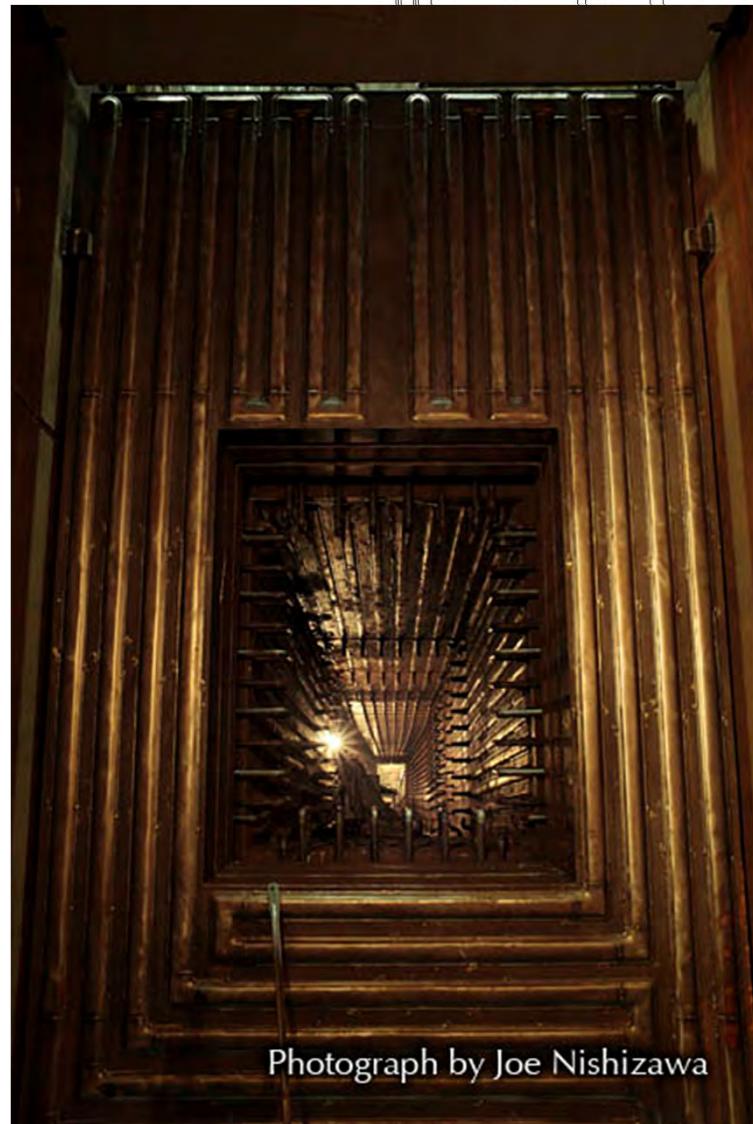
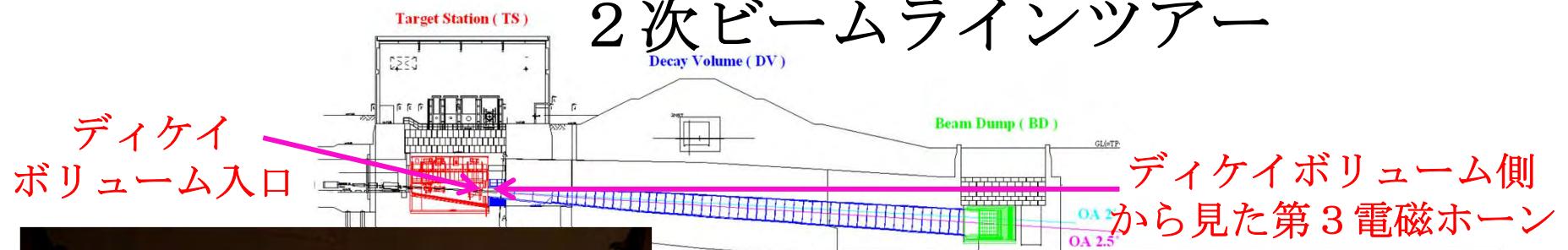
第1電磁ホーン



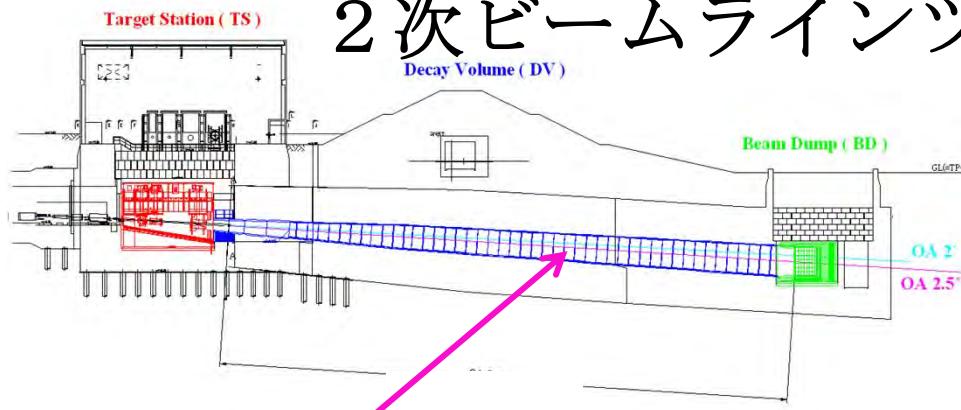
2次ビームラインツアー



2次ビームラインツアー



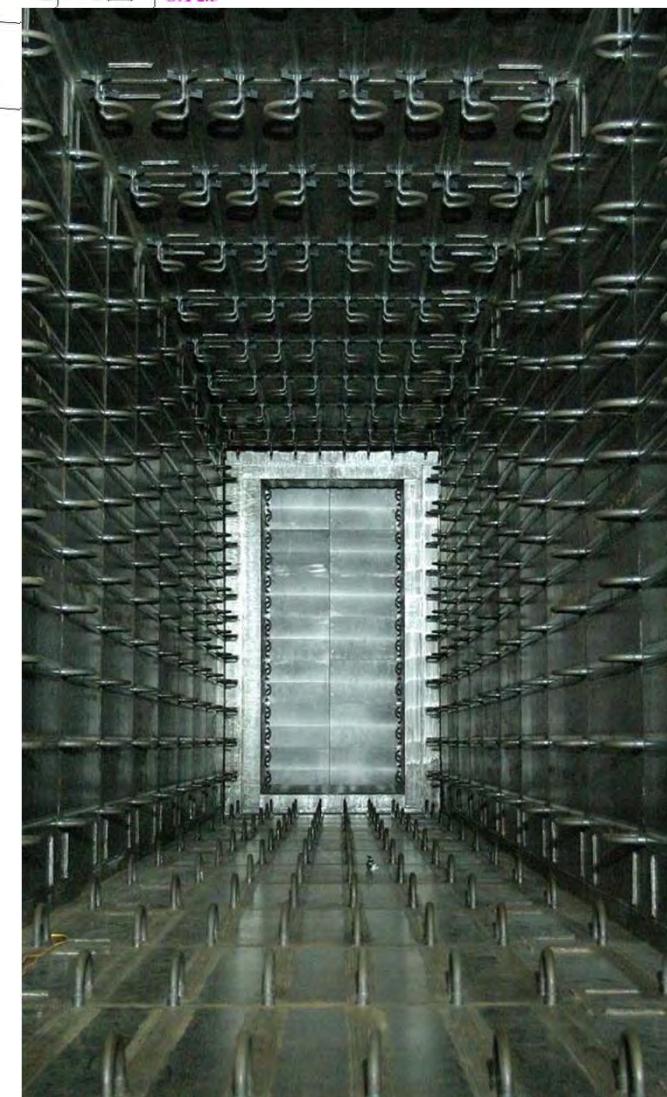
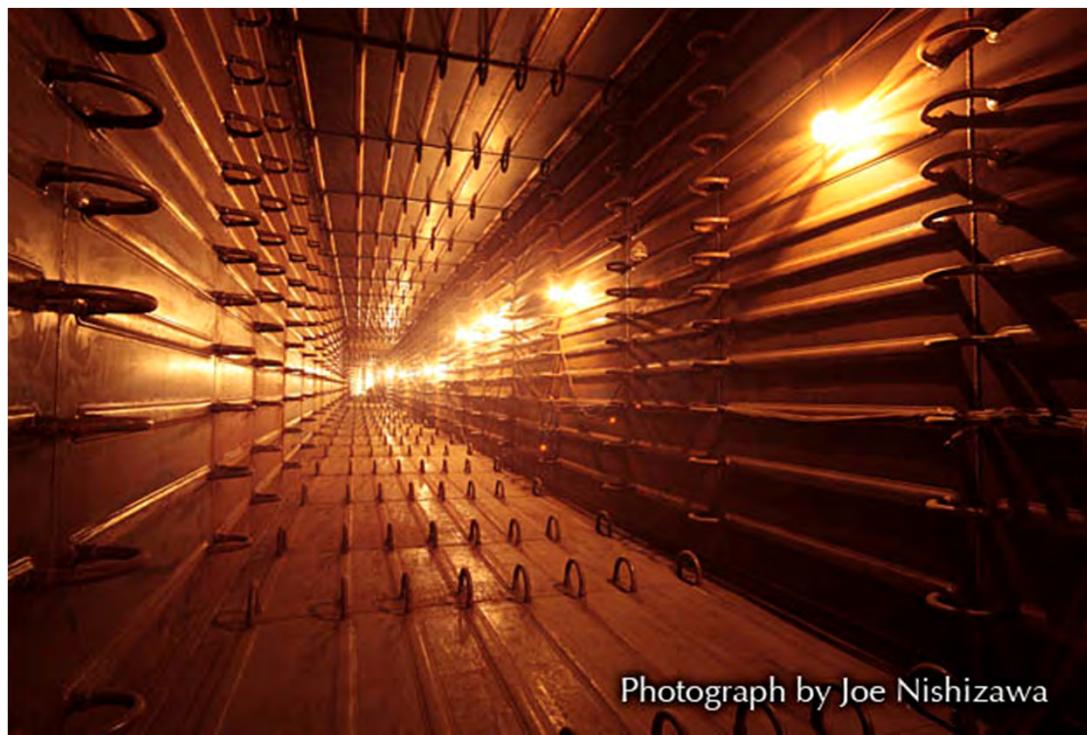
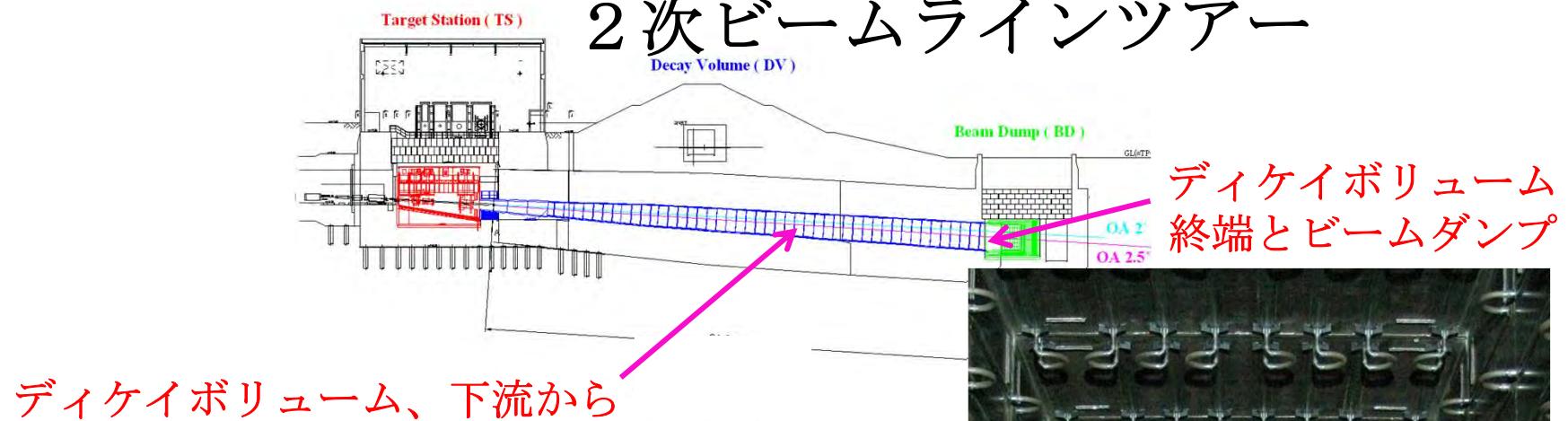
2次ビームラインツアー



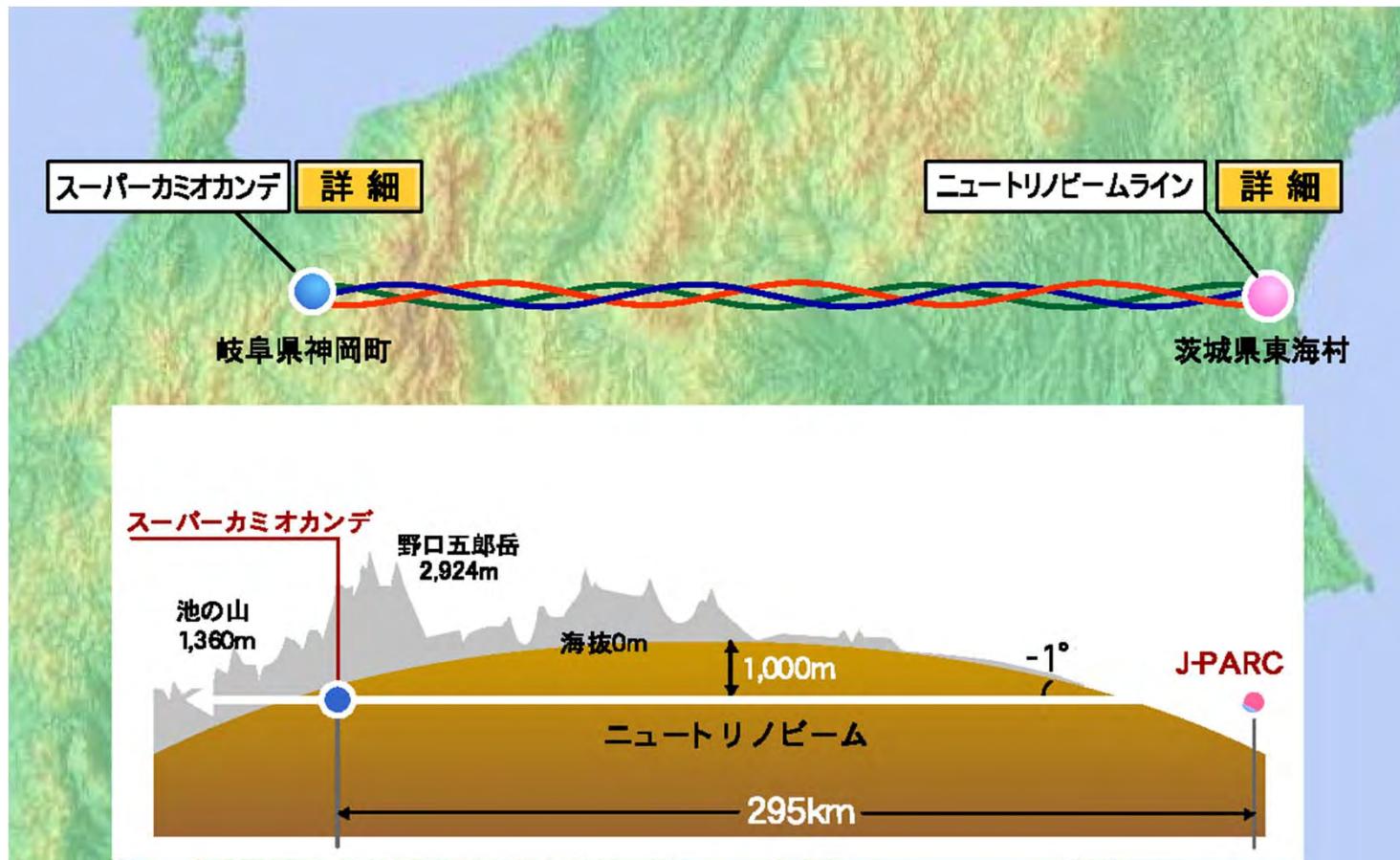
ディケイボリューム、下流から



2次ビームラインツアー



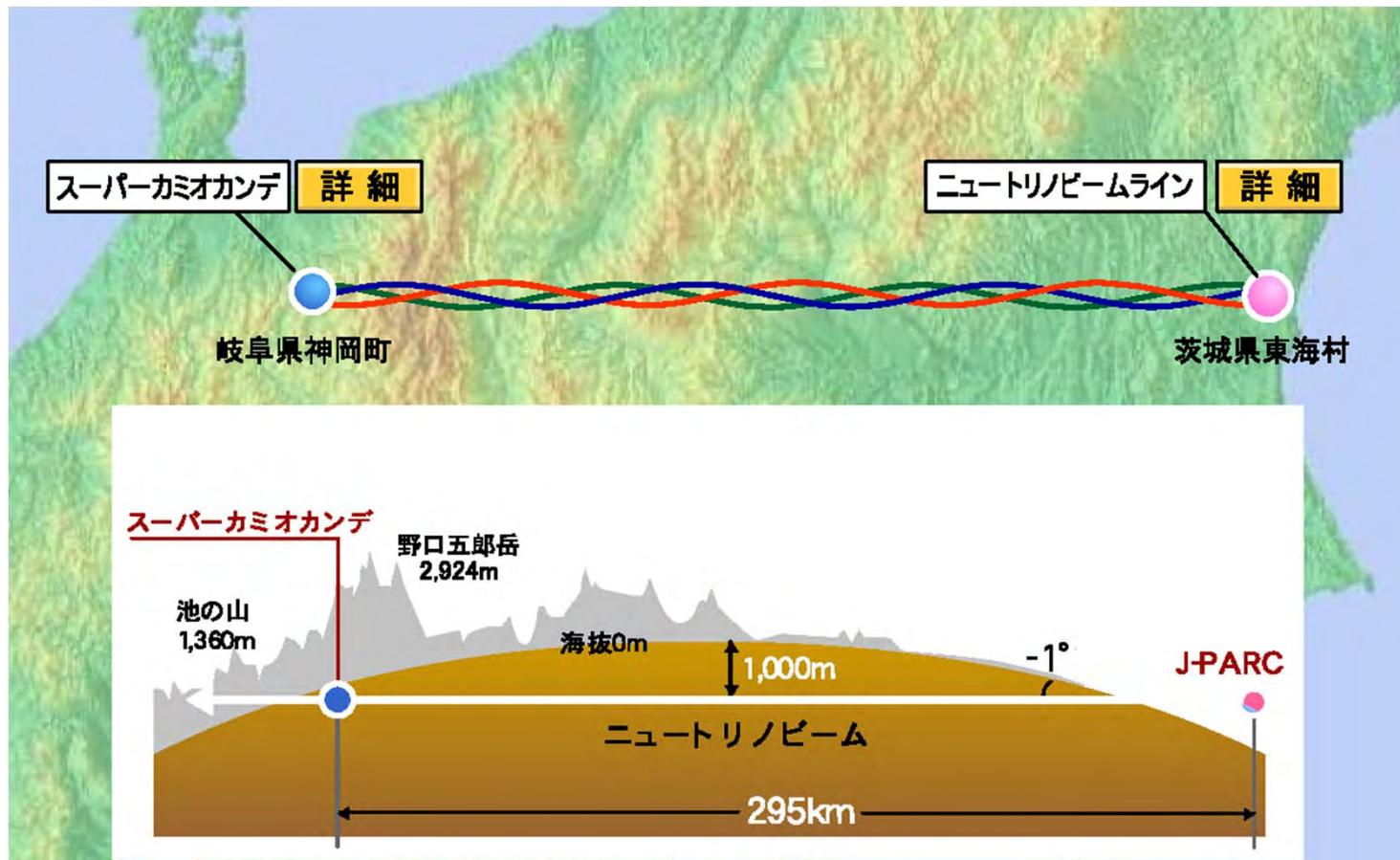
何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか？？



何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか？？

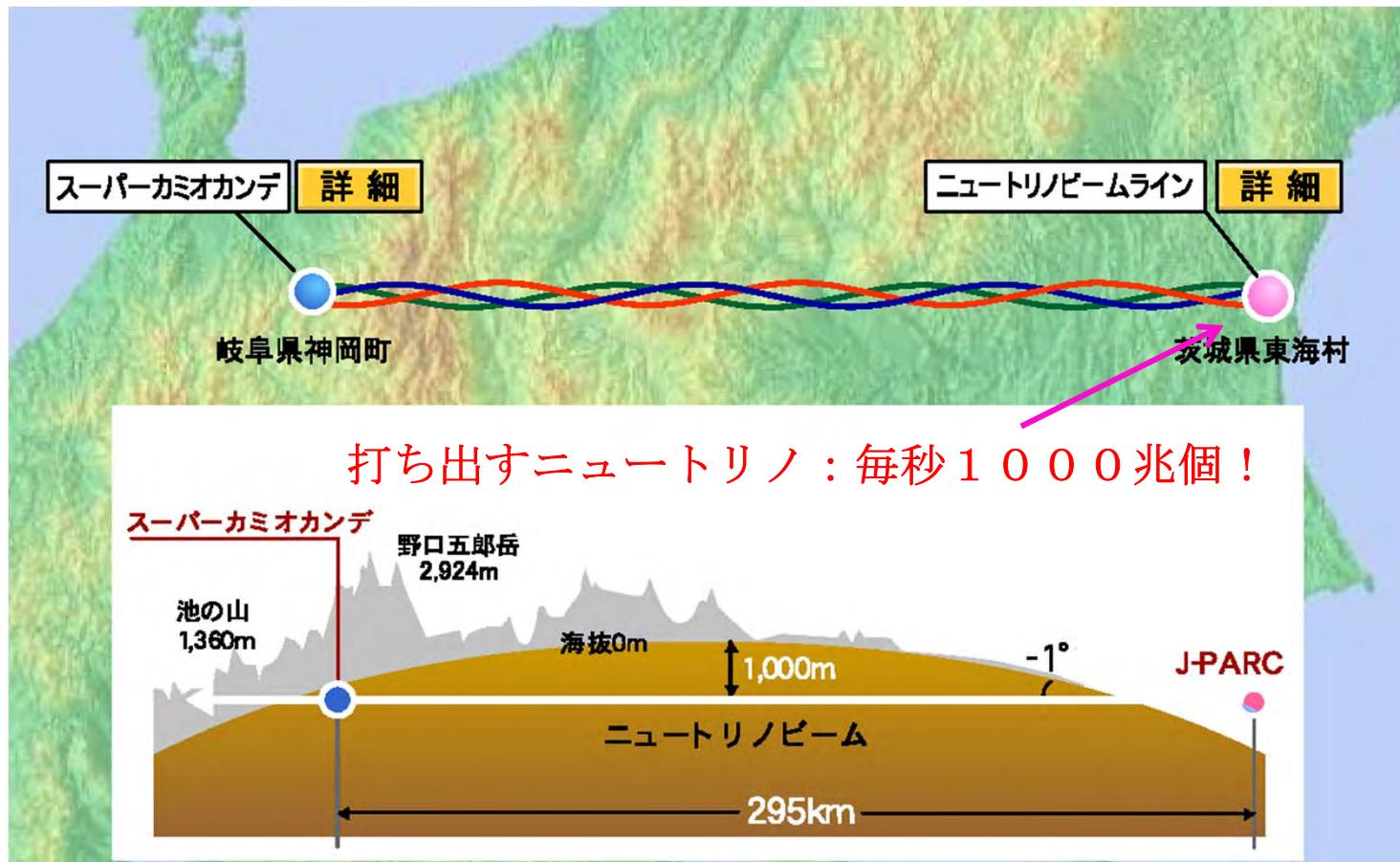


下手な鉄砲数撃ちや当たる！



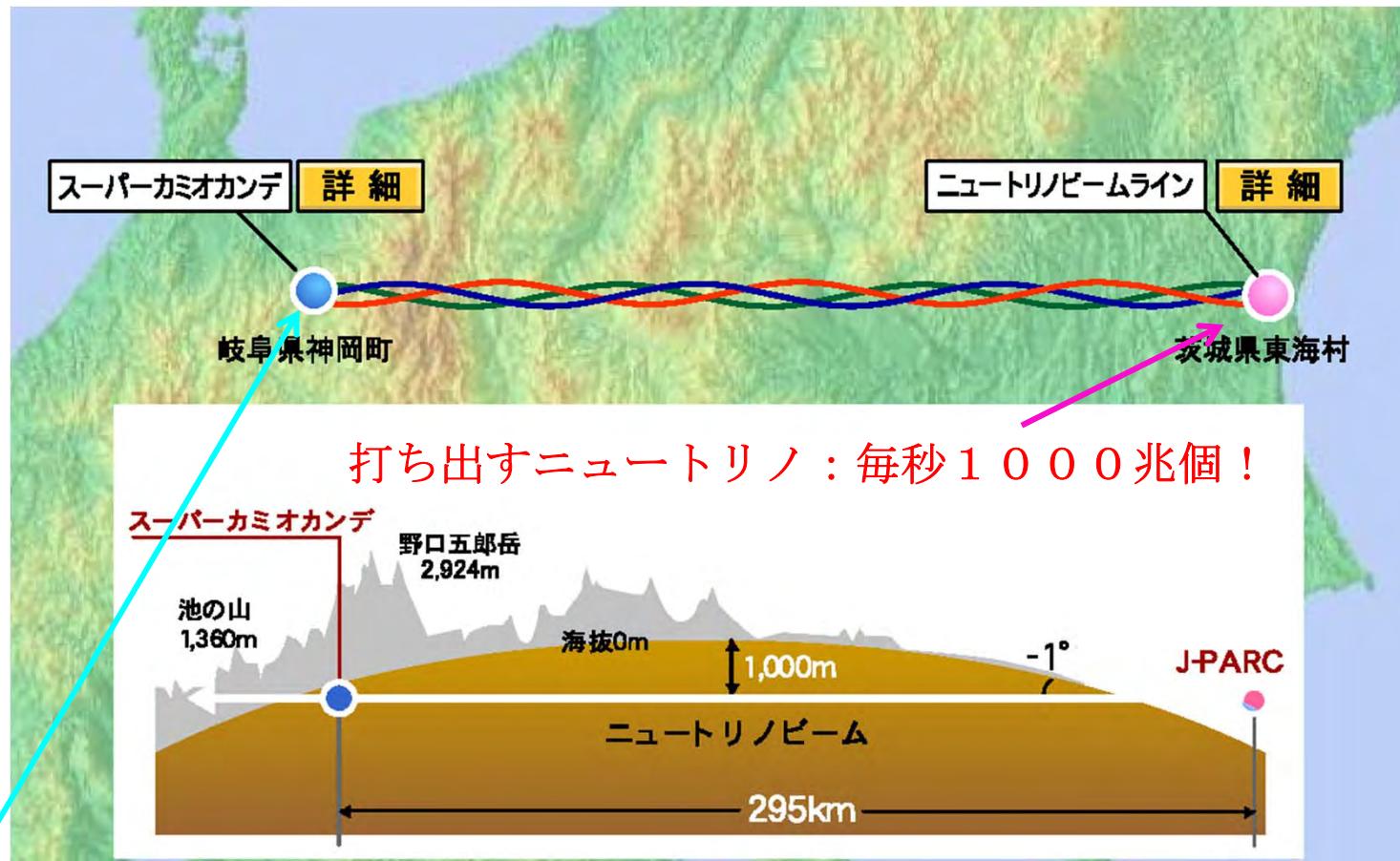
何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか？？

↓
下手な鉄砲数撃ちや当たる！



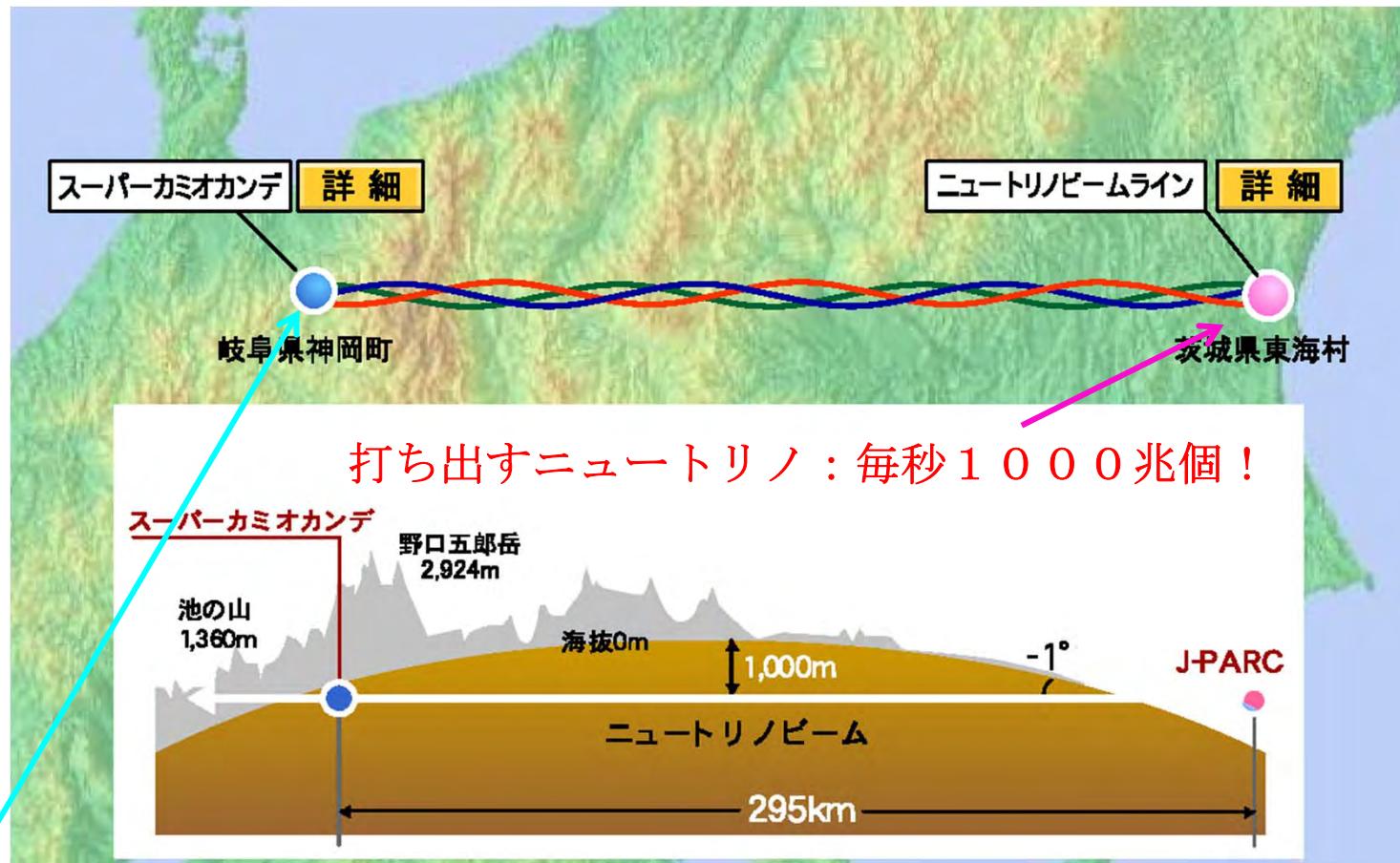
何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか？？

↓
下手な鉄砲数撃ちや当たる！



何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか？？

↓
下手な鉄砲数撃ちや当たる！



カミオカンデに当たるニュートリノ：30,000,000個/sec

→ 検出出来るニュートリノ：10個/day

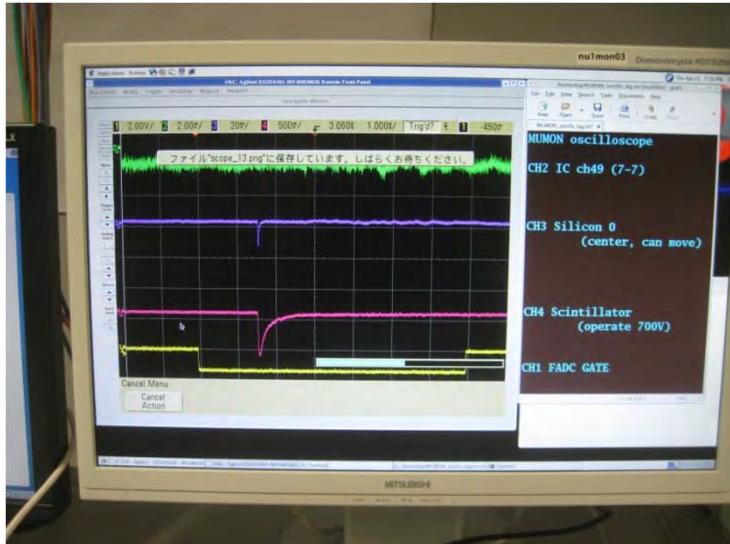
建設の歴史

	FY2004	FY2005	FY2006	FY2007	FY2008	FY2009	FY2010	FY2011
1次BL建築		地下トンネル建設					調査・復旧	
常伝導電磁石		製造		設置			調査・復旧	
超伝導電磁石		製造		電磁石・冷凍機設置			調査・復旧	
ビームモニター		製造・開発		設置			調査・復旧	
2次BL建築	DV上流部建設		TS建設	DV下流部建設			調査・復旧	
ターゲット		製造・開発		設置			調査・復旧	
電磁ホーン		製造・開発		設置			調査・復旧	
TS		ヘリウム容器製造	ヘリウム容器設置	その他機器設置			調査・復旧	
DV	組立 設置			組立 設置			調査・復旧	
BD				製造・組立 設置			調査・復旧	
ミューオンモニター				製造・開発 設置			調査・復旧	
NM建築				ニュートリノモニター棟建設			調査・復旧	
オンアクシスモニタ				電磁石設置 BKT設置 測定器設置			調査・復旧	
オフアクシスモニタ				TP製作 モジュール組立・設置			調査・復旧	

Beam Commissioning!

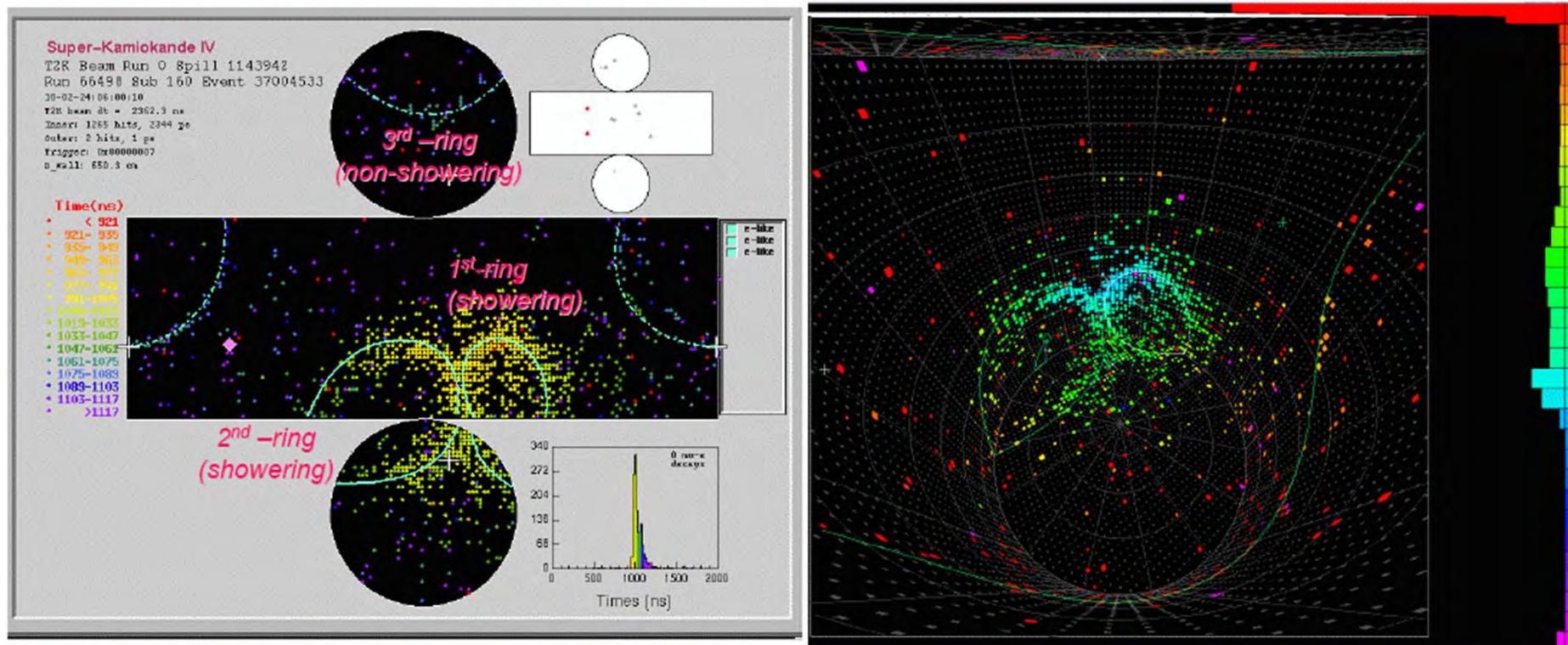
2009年4月23日、ニュートリノビーム生成に成功！

初めてのニュートリノビームの信号



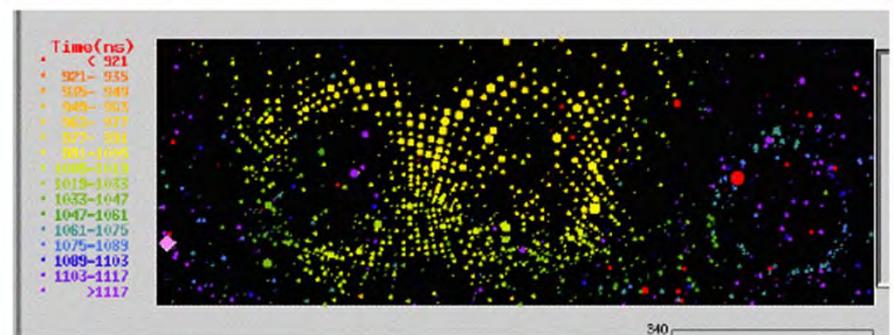
2010年2月24日、神岡でニュートリノを観測！

初めてのニュートリノビームの信号@神岡



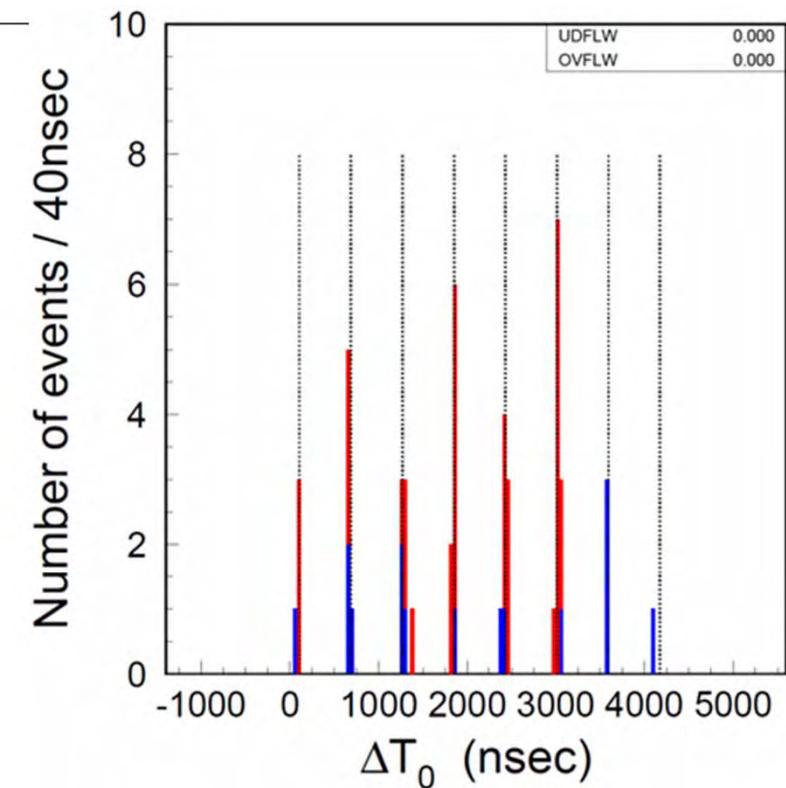
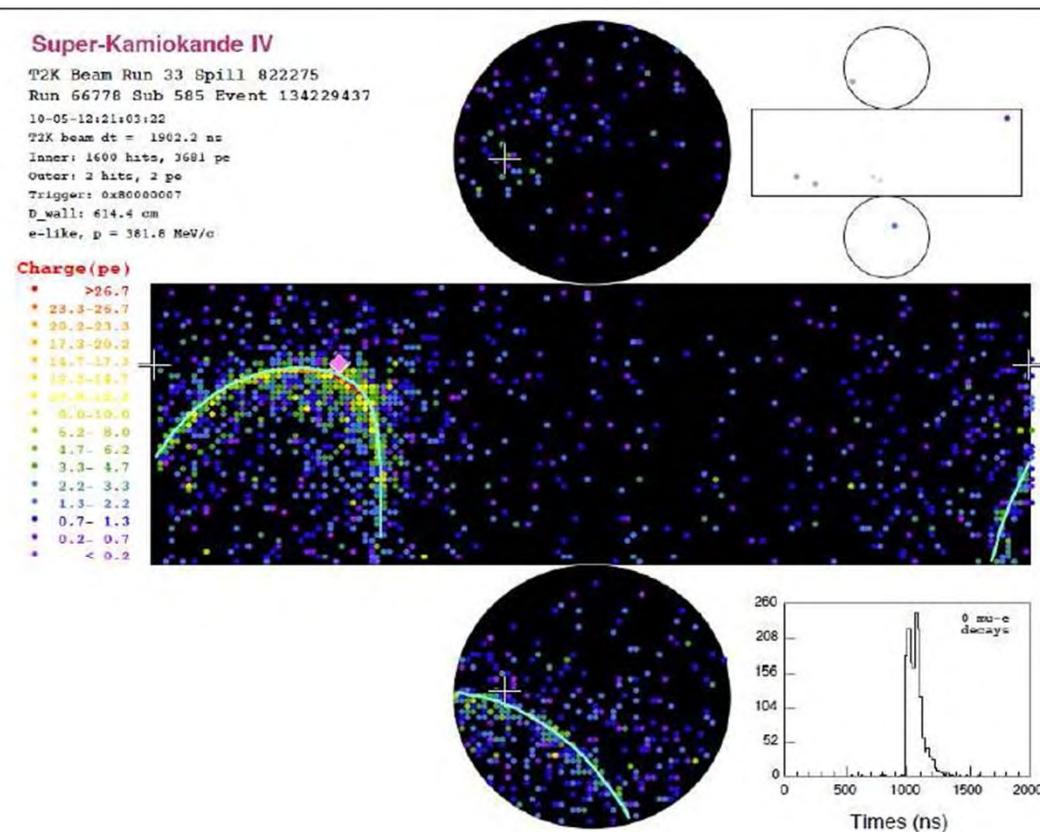
1st ring + 2nd ring

Invariant mass : $133.8 \text{ MeV}/c^2$
(close to π^0 mass)
momentum : $148.3 \text{ MeV}/c$

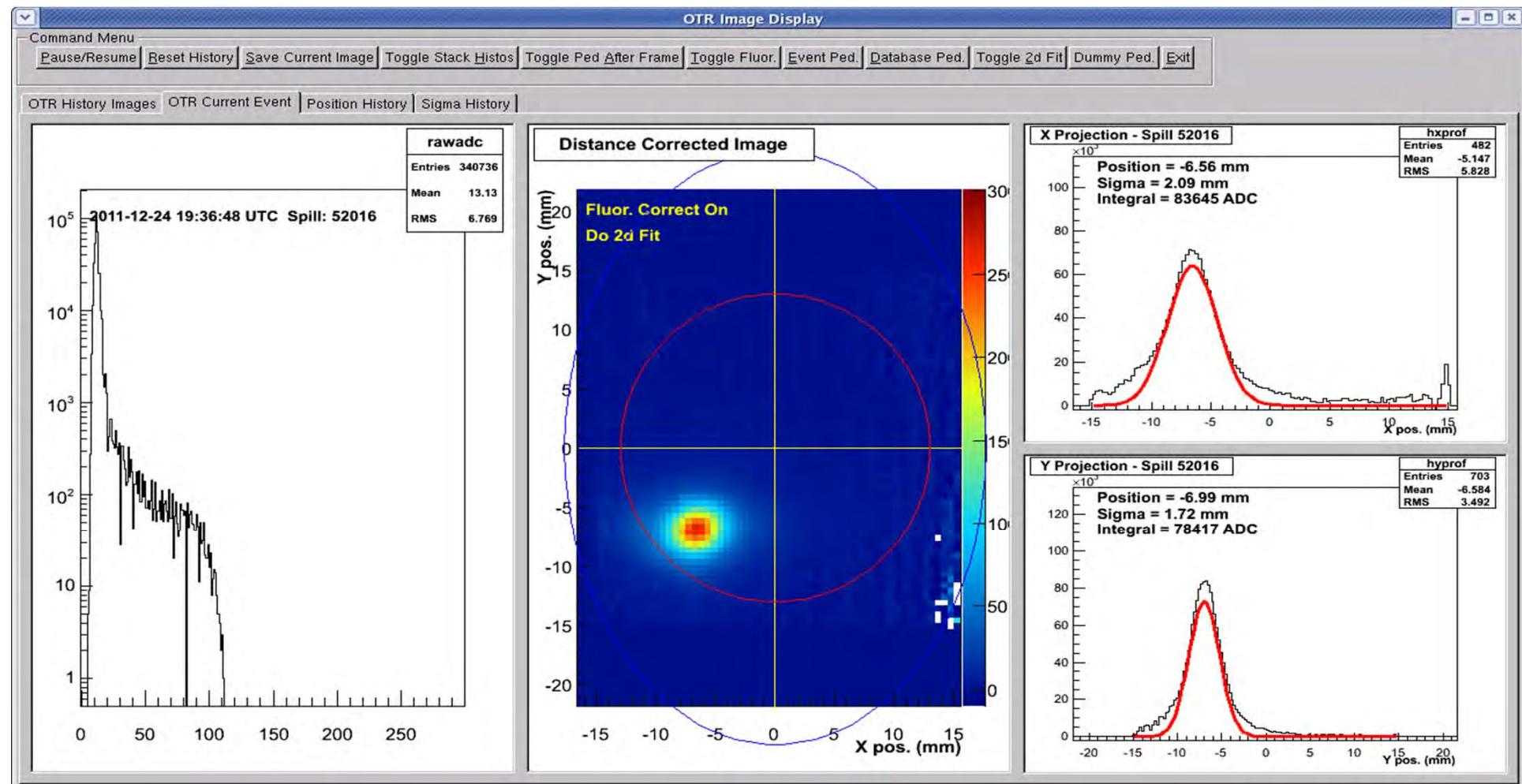


2010年5月10日、世界初の、
ミューゲージュートリノから電子ニュートリノへの変化を観測！

初めての電子ニュートリノの信号@神岡

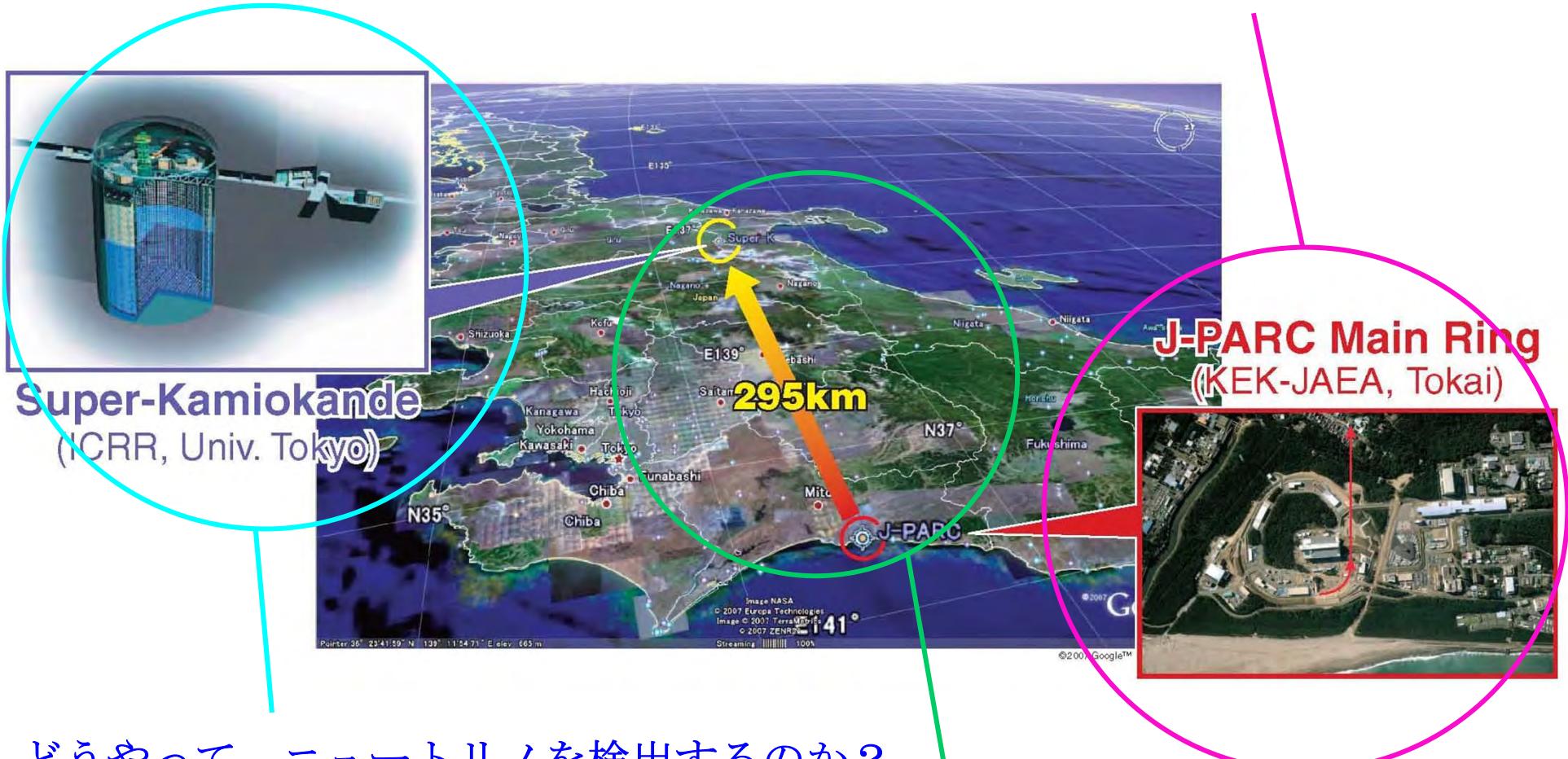


2011年12月24日、震災後初のニュートリノを生成！



素粒子物理学の世界によこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ！

どうやって、ニュートリノをつくり出すのか？

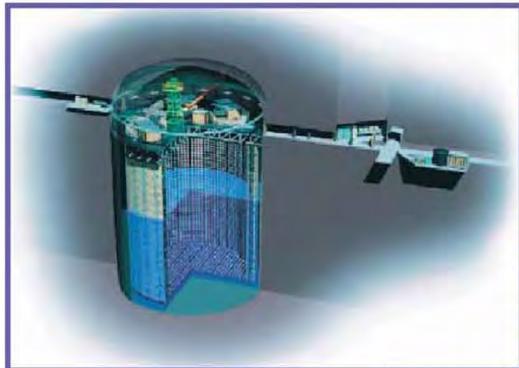


どうやって、ニュートリノを検出するのか？

この間に、何が起こっているのか？

素粒子物理学の世界によこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ！

どうやって、ニュートリノをつくり出すのか？



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



素粒子物理学の世界にようこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ！



この間に、何が起こっているのか？

次回予告

J-Lunch 第6回

ニュートリノ

ニュートリノ振動