

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

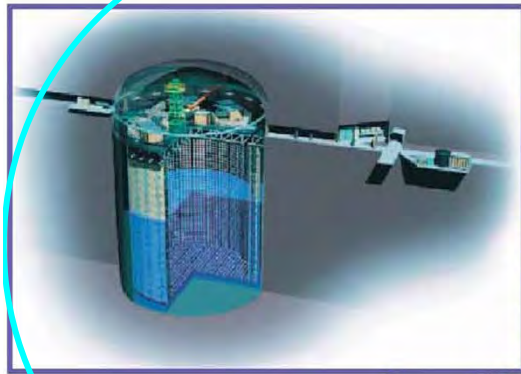
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

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うこそ！(°▽°)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)



どうやって、ニュートリノを検出するのか？

この間に、何が起きているのか？

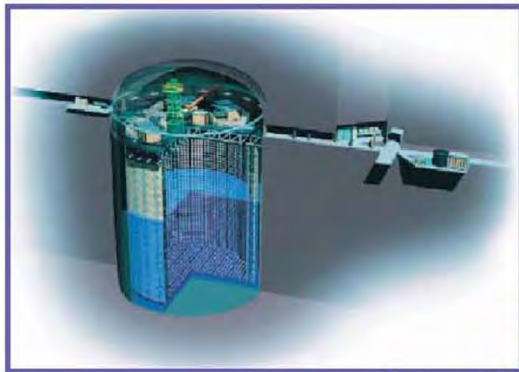
素粒子物理学の世界にようこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ!



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ろこそ！(°▽°)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

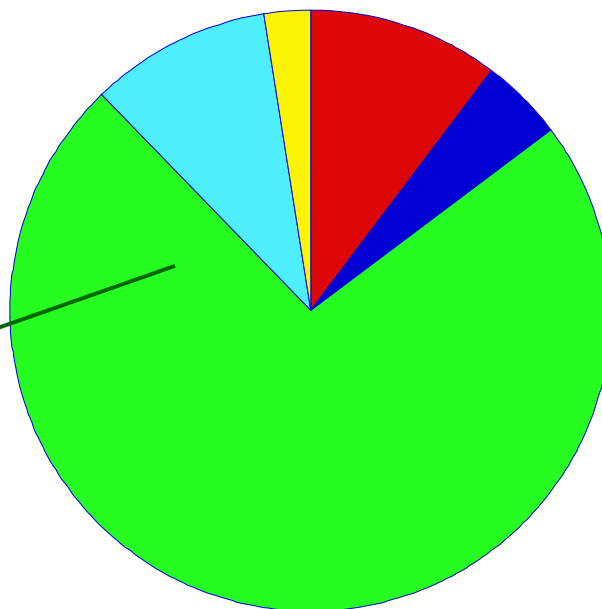
粒子を加速する装置

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

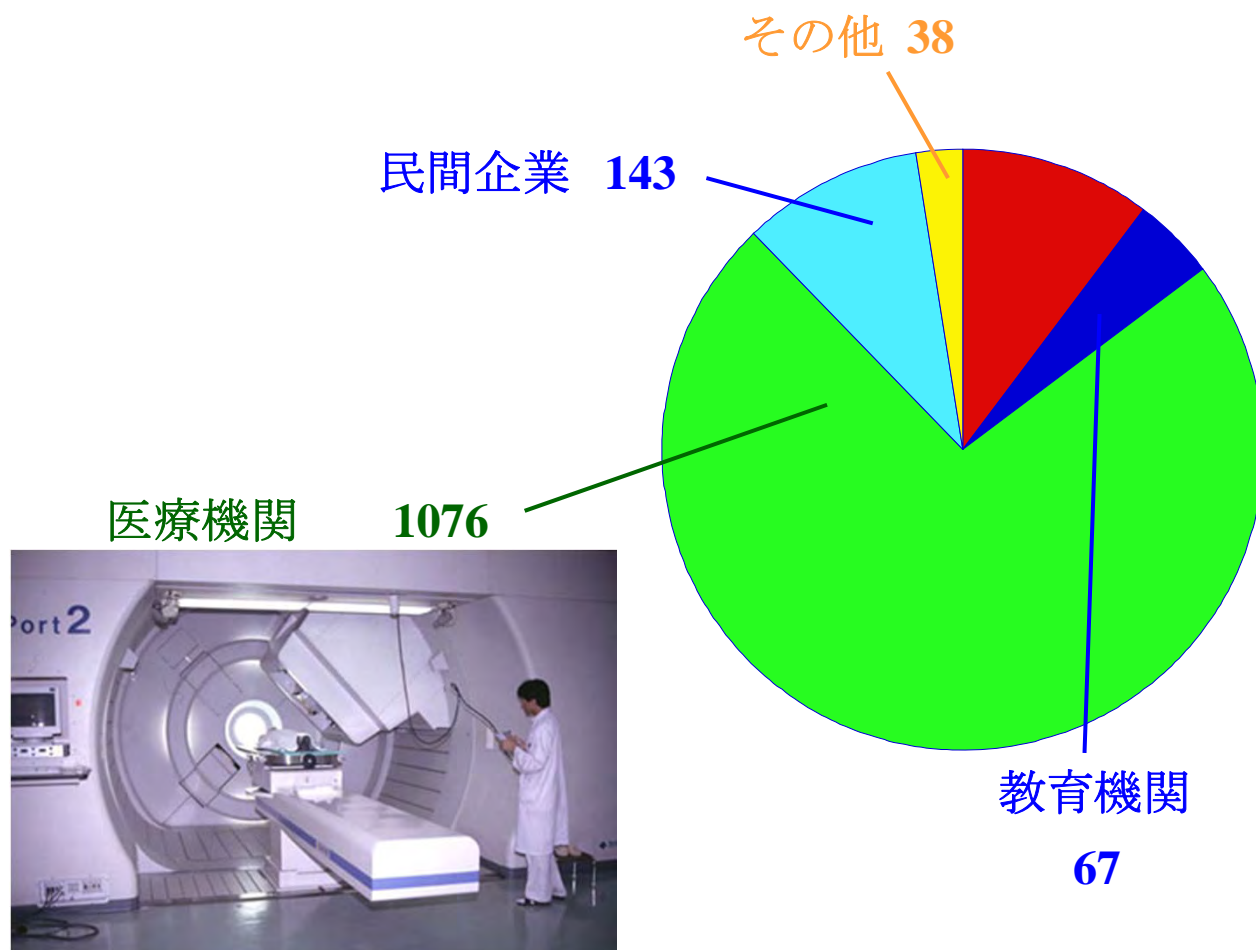
1076



加速器とは

粒子を加速する装置

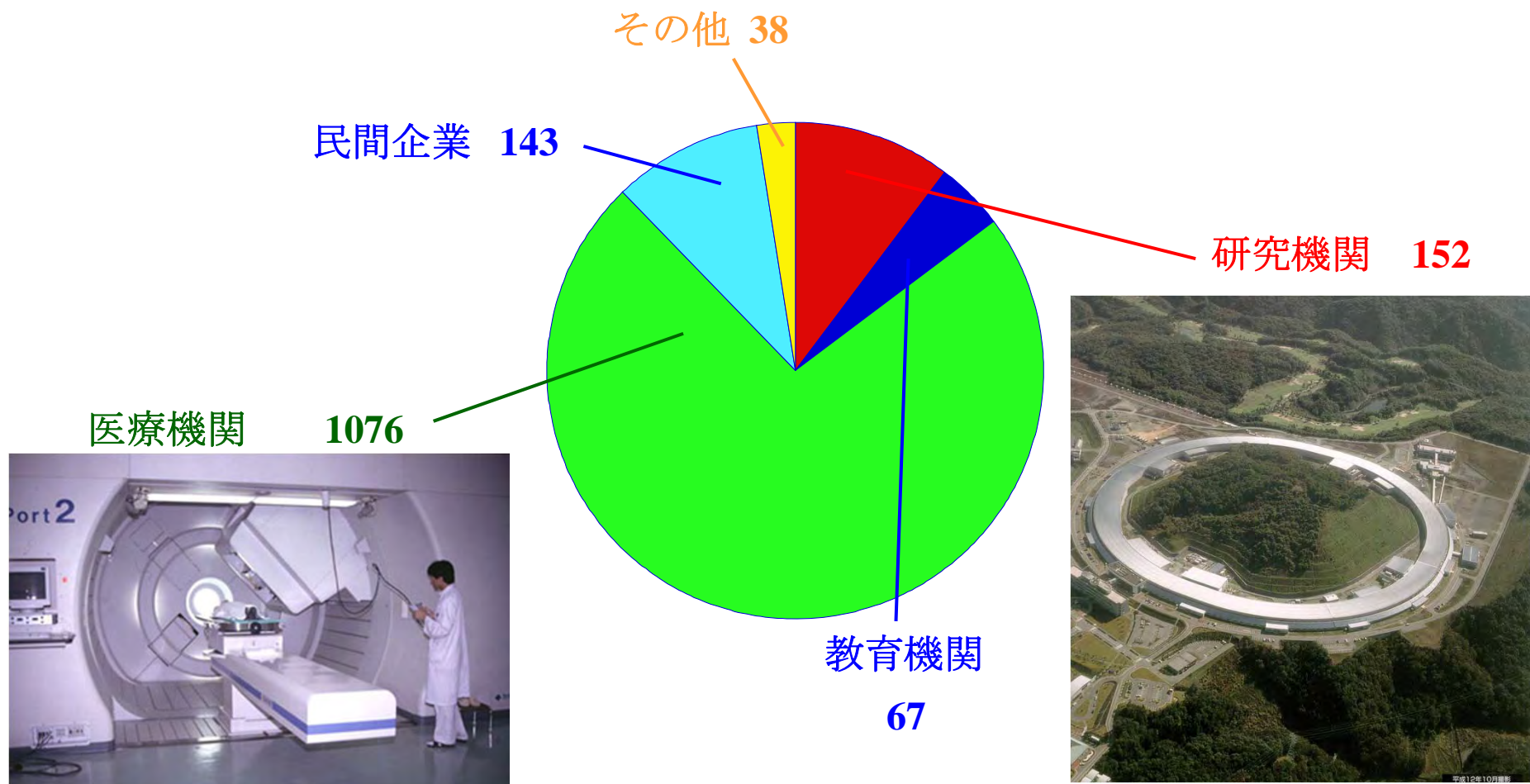
日本の加速器：1476台（2010年）



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

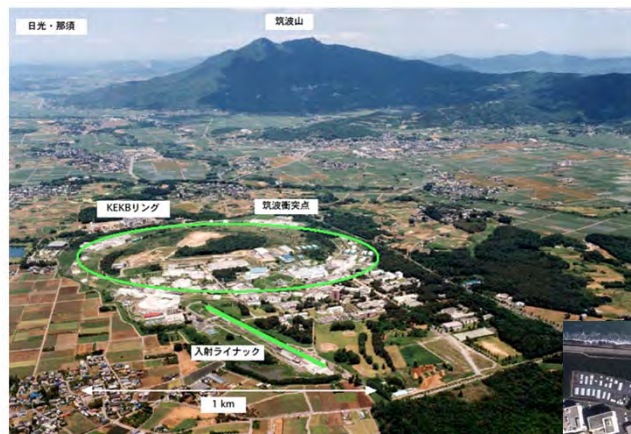


SLAC



素粒子物理学の研究に用いられる加速器

KEKB



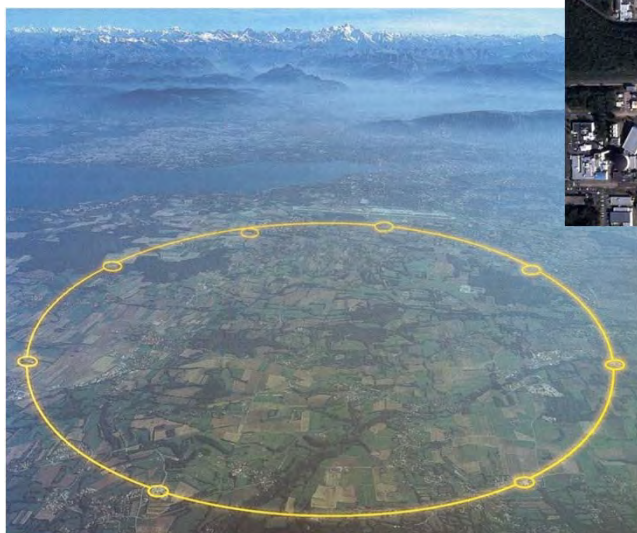
Tevatron



J-PARC



LHC



SLAC

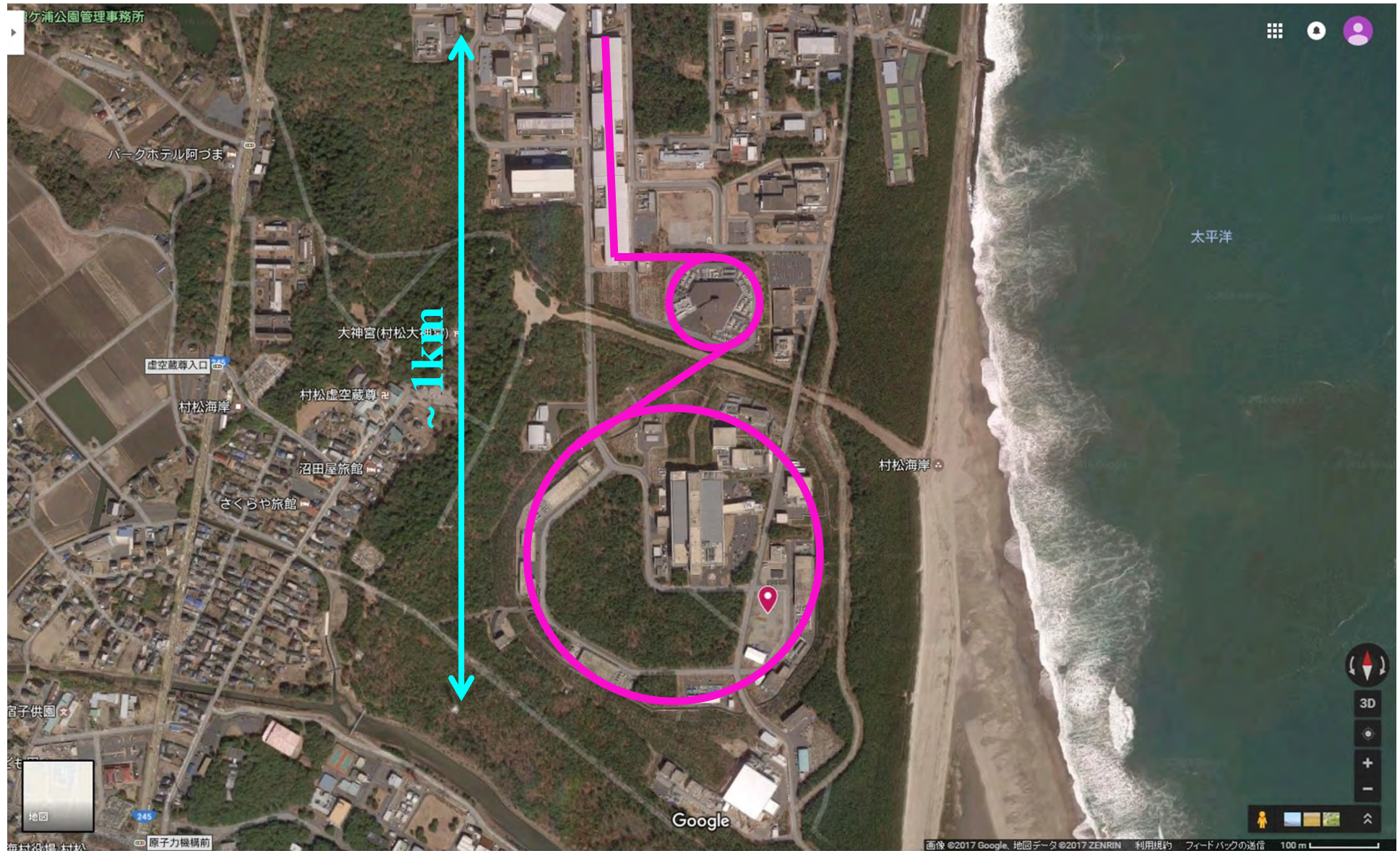


無駄にでかいのが特徴

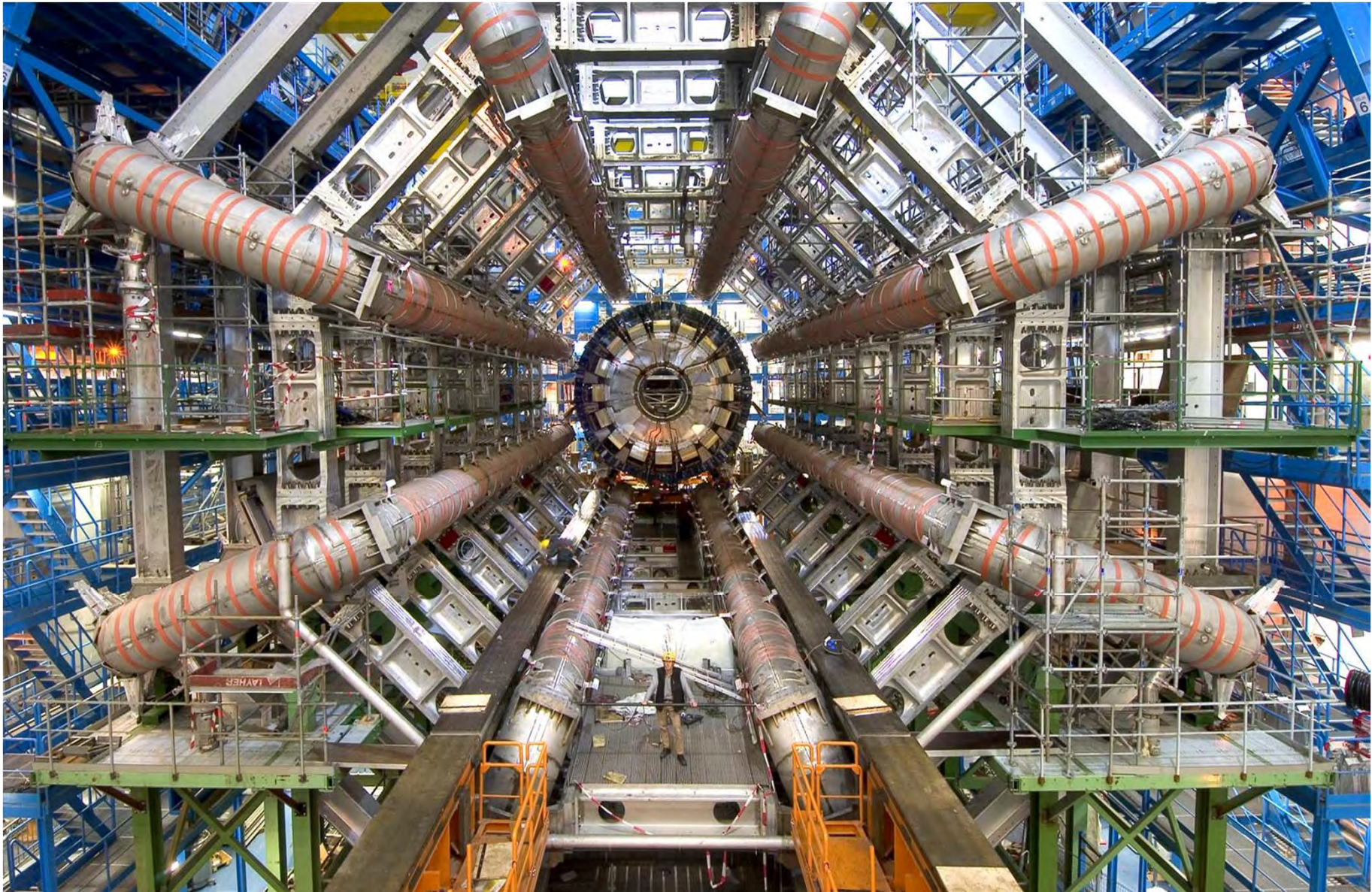
J-PARC

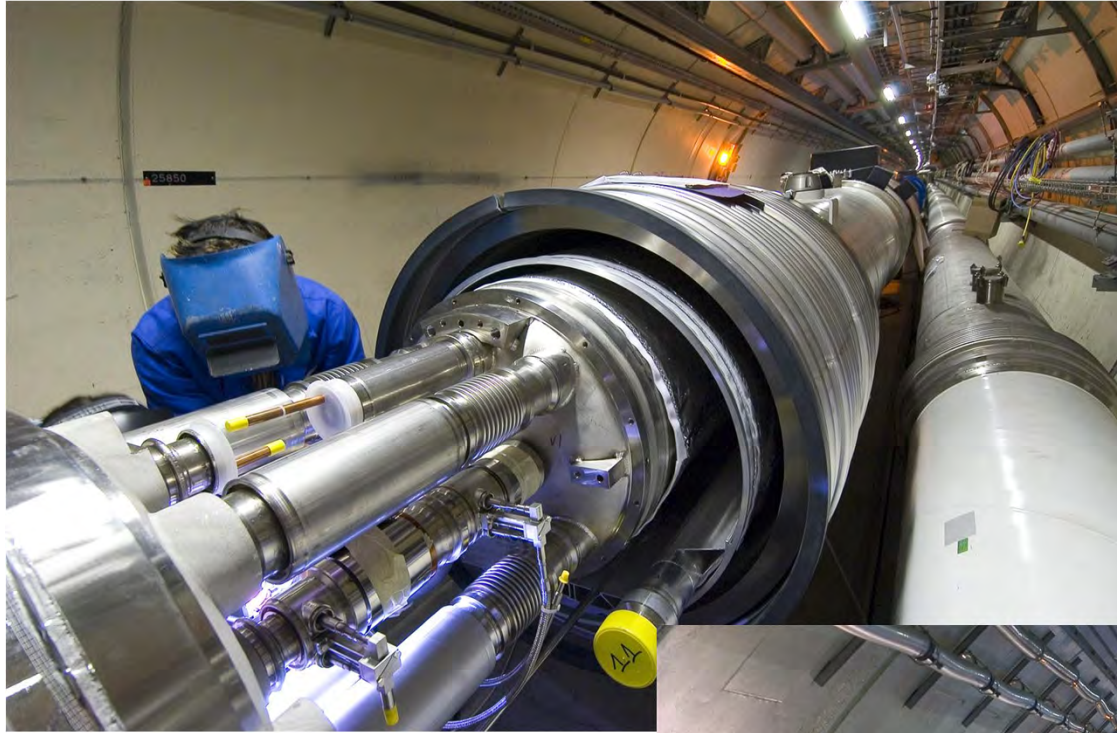


J-PARC



LHC : 人類最大の加速器

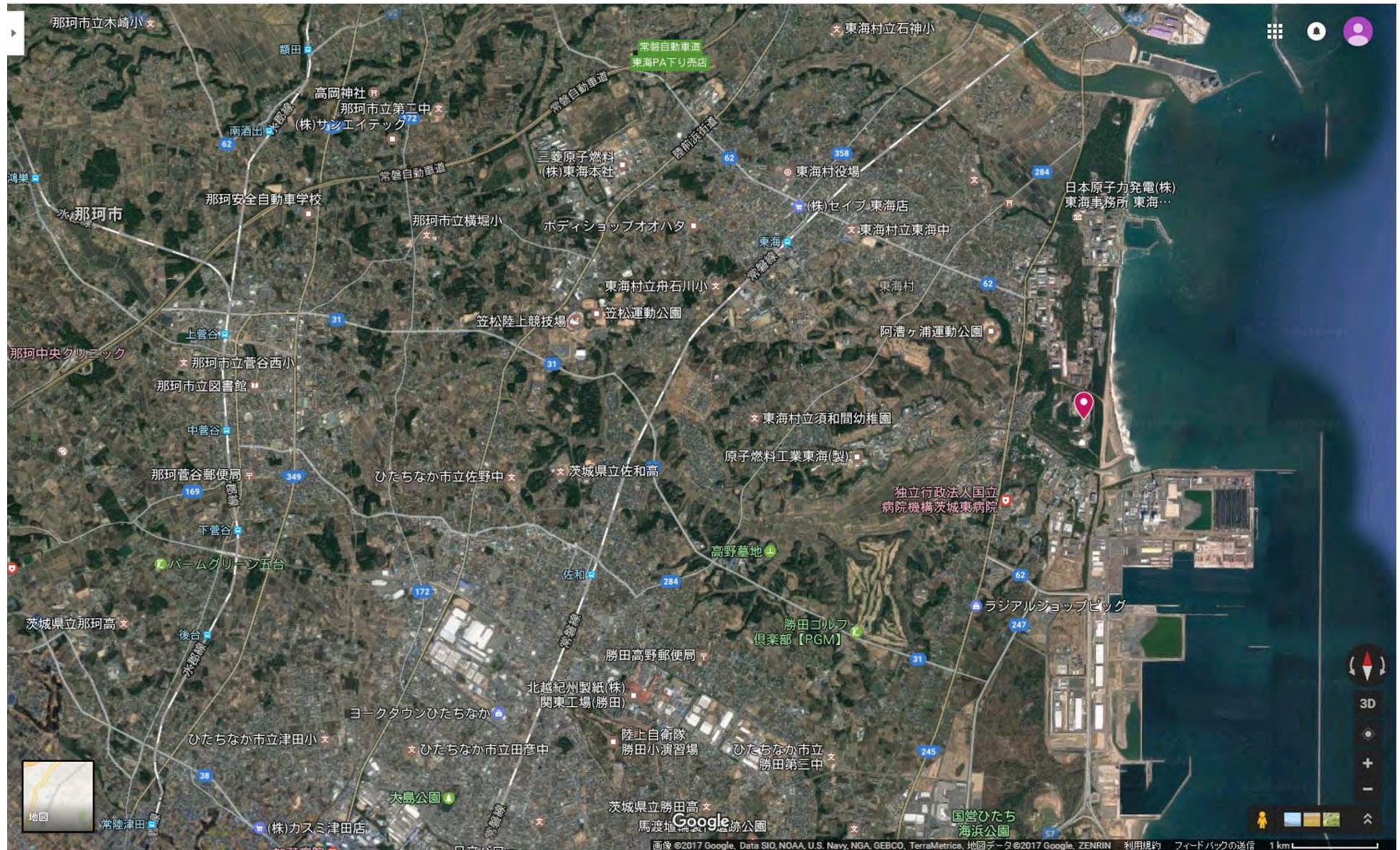




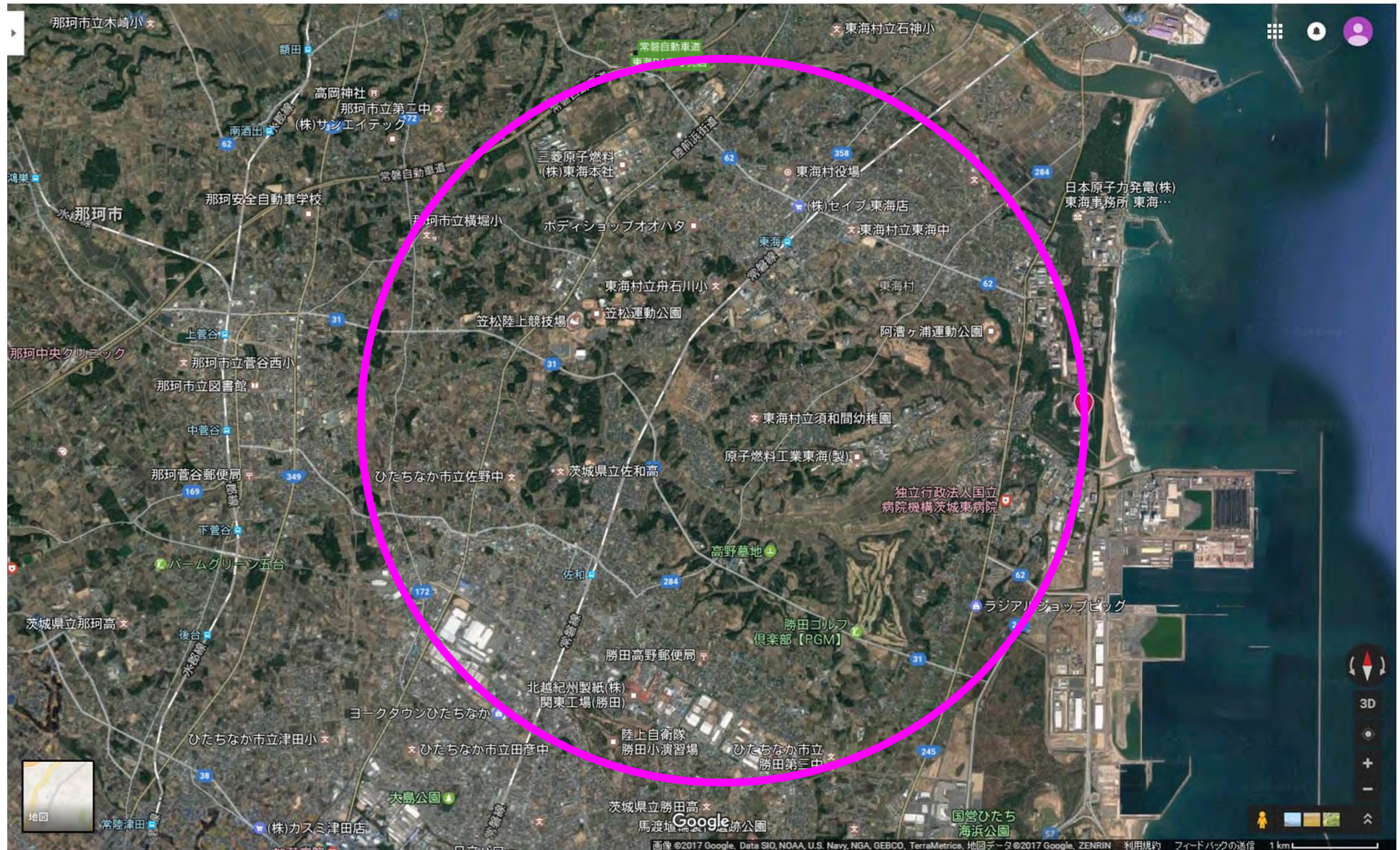
LHC
：人類最大の加速器



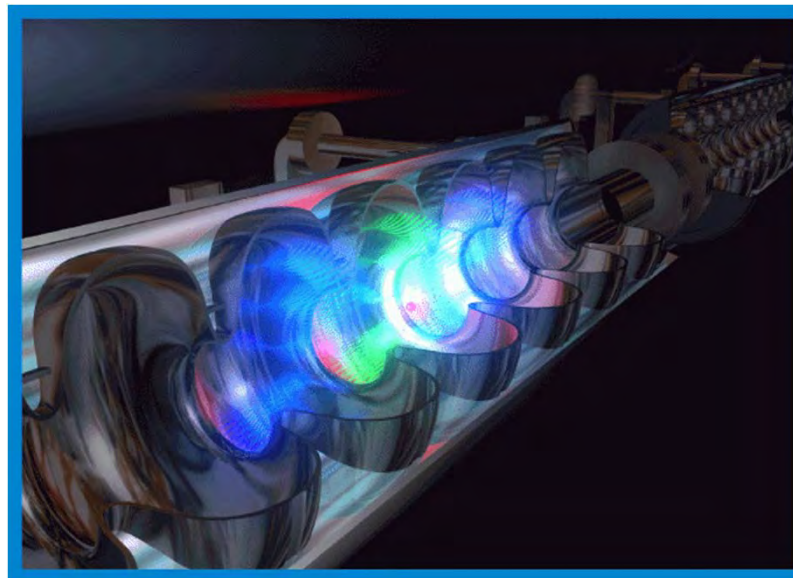
J-PARCにLHCがあったら. . .



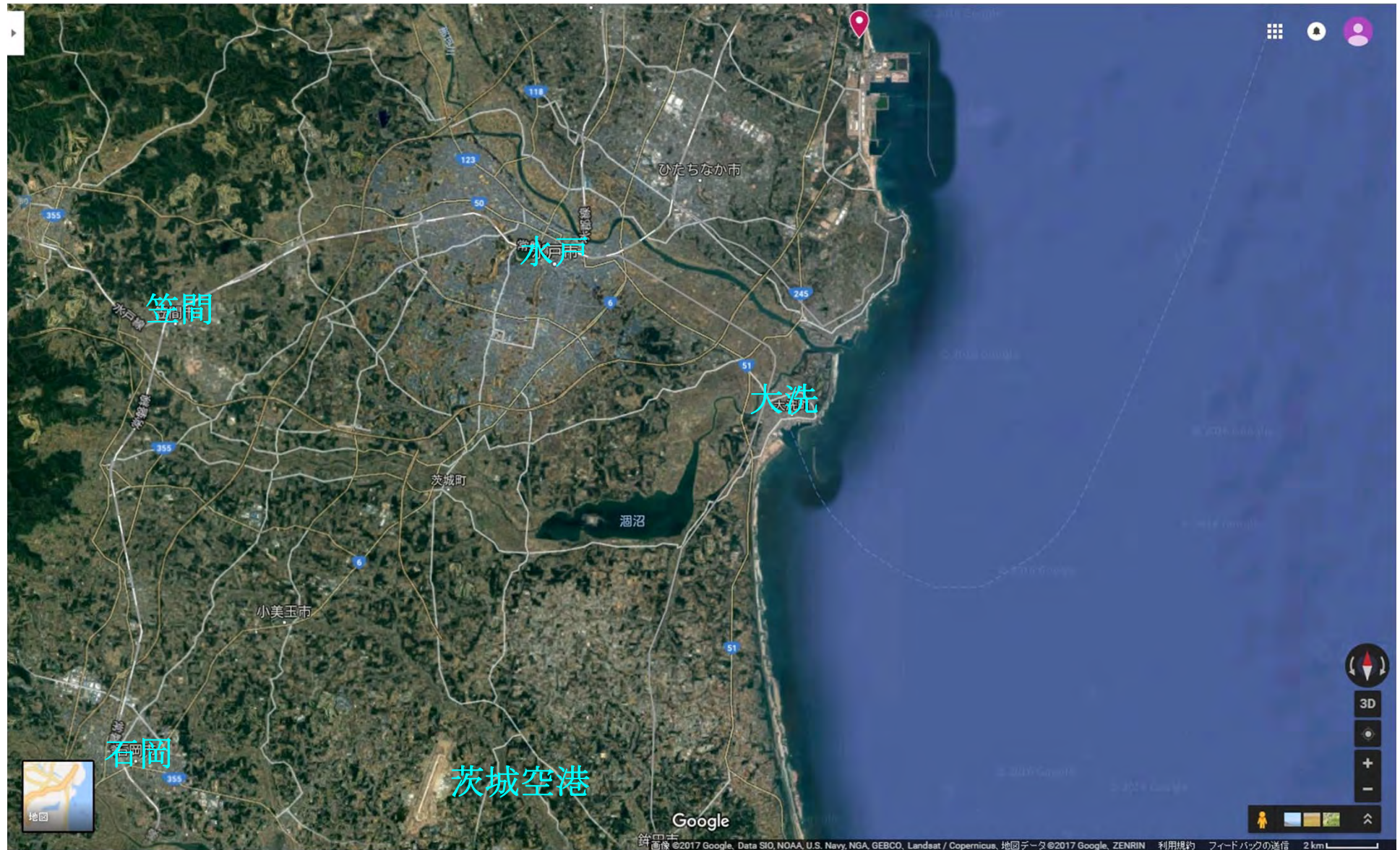
J-PARCにLHCがあったら．．．



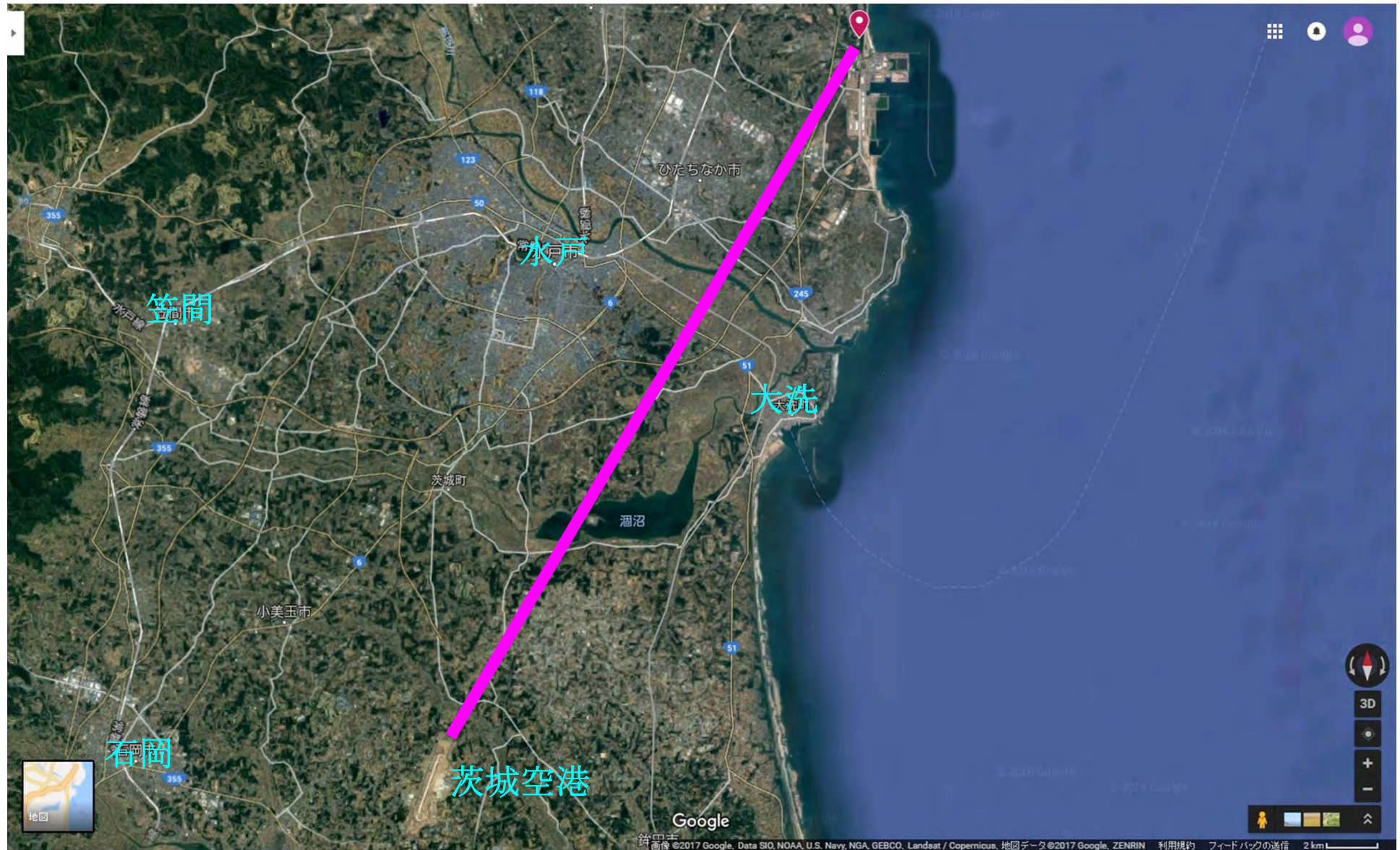
ILC：現在計画中の史上空前の加速器



J-PARCにILCがあったら．．．



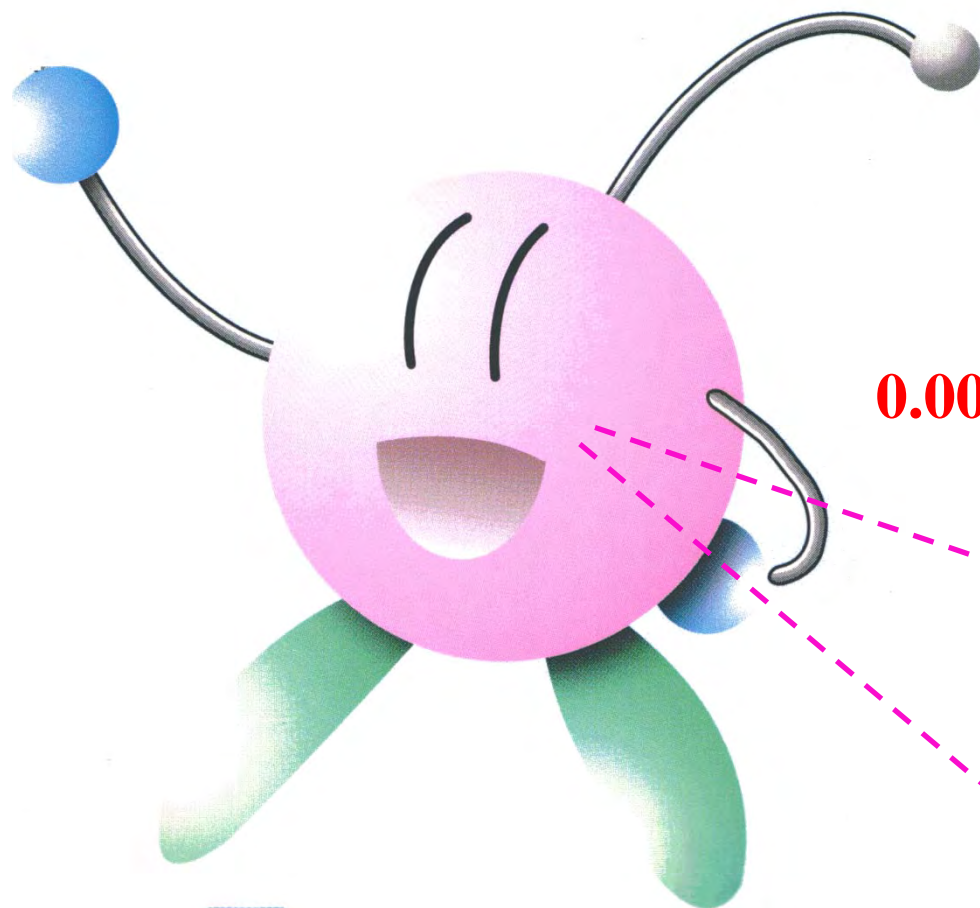
J-PARCにILCがあったら．．．



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)

ものの大きさ



原子核物理学

陽子

$0.0000000000000001\text{ m}$

素粒子物理学

素粒子

$0.00000000000000000001\text{ m}$ 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)

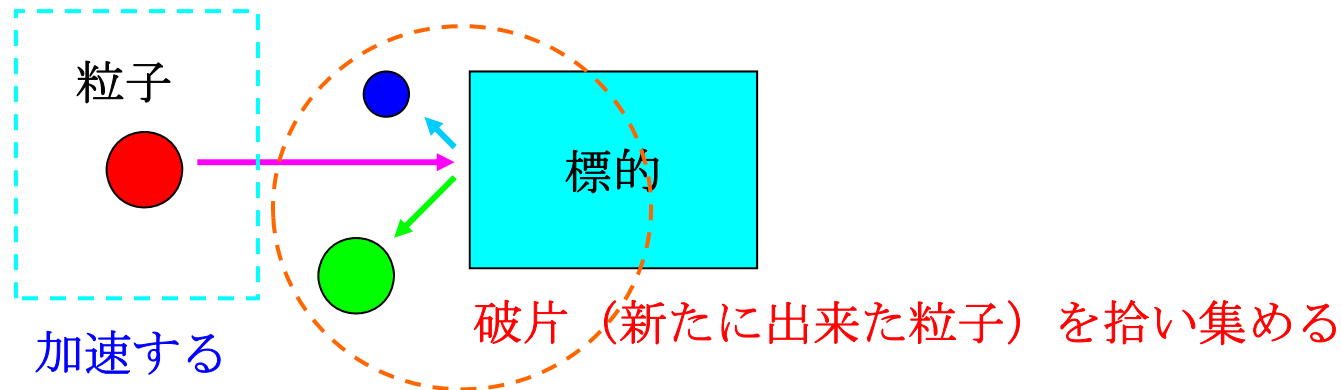


ぶつけて壊して調べる！

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

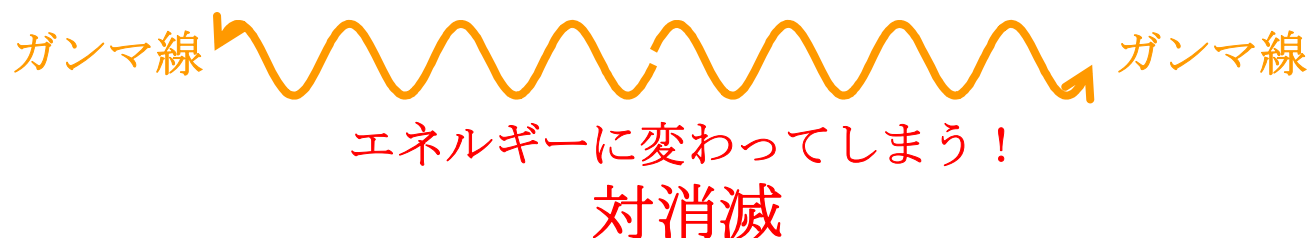
反粒子：質量等が同じで、電荷が逆の粒子

電子 \longleftrightarrow 陽電子

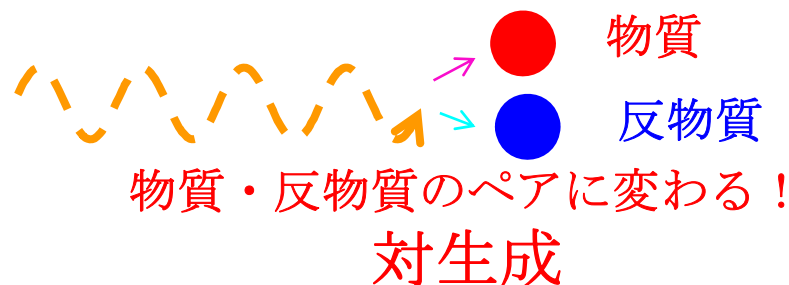
陽子 \longleftrightarrow 反陽子

ニュートリノ \longleftrightarrow 反ニュートリノ

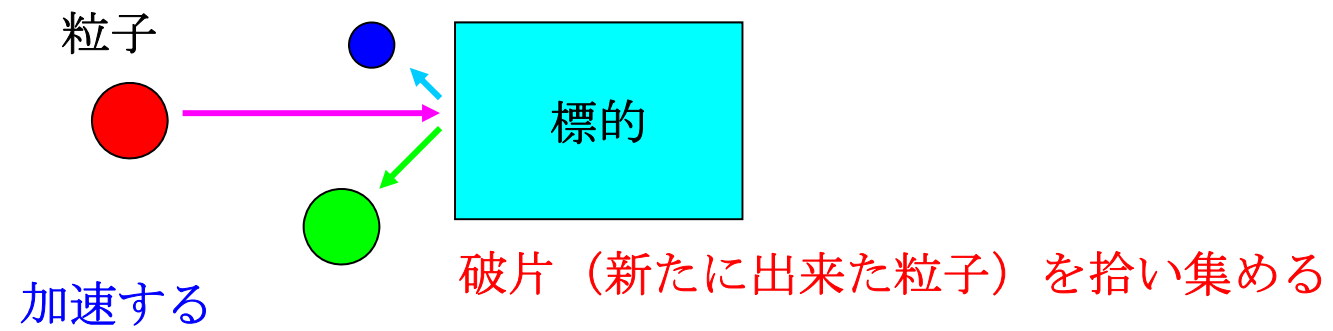
物質と反物質が出逢うと、、

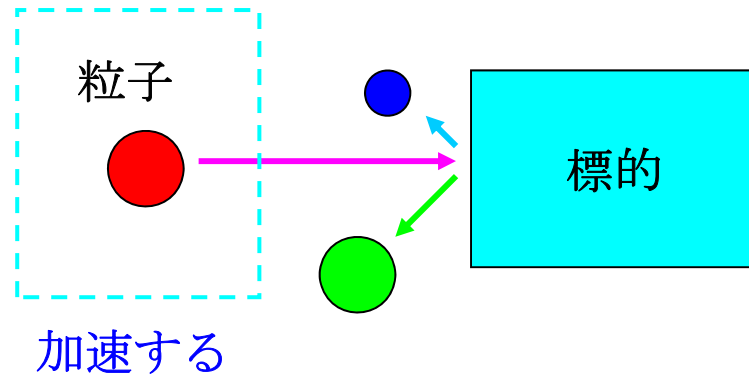


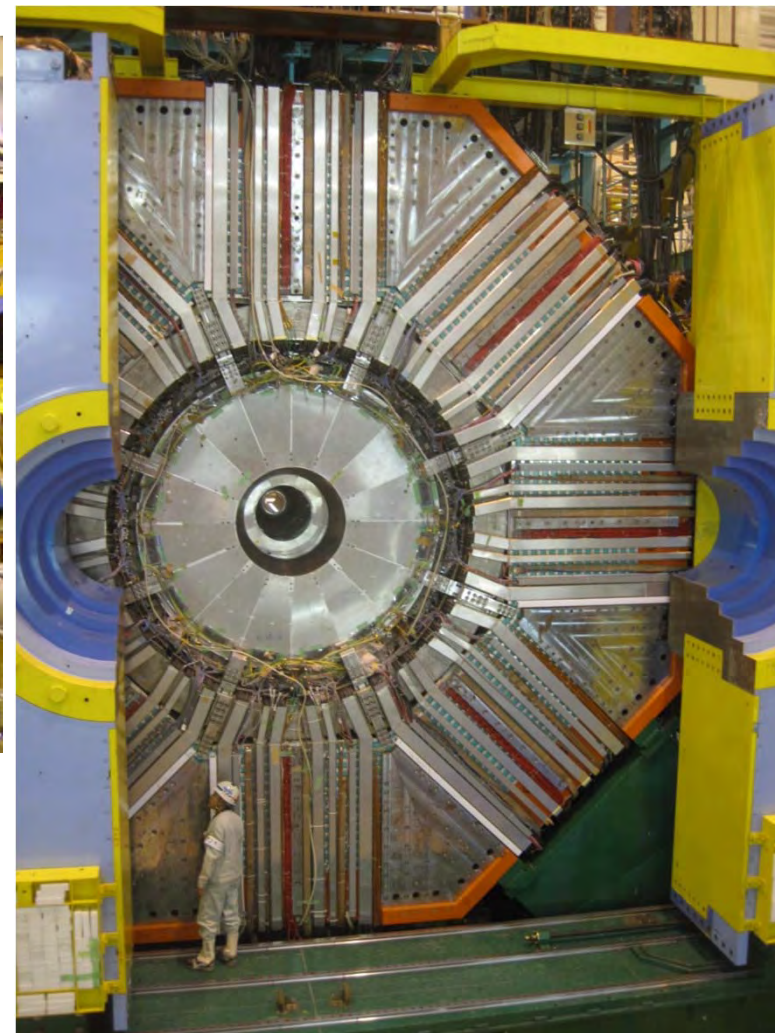
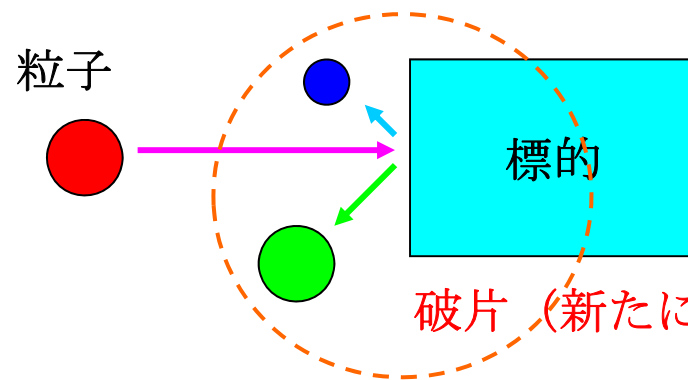
逆に、十分なエネルギーがあると、



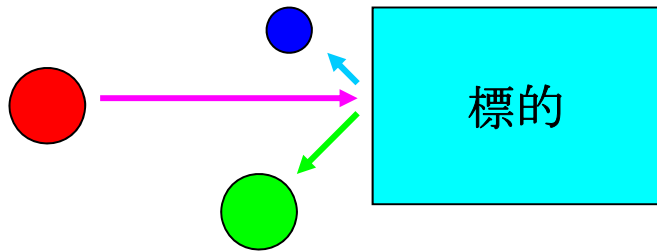
宇宙にある物質は、このようにして生まれた！







加速器の種類



静止標的型
数が欲しい

J-PARC

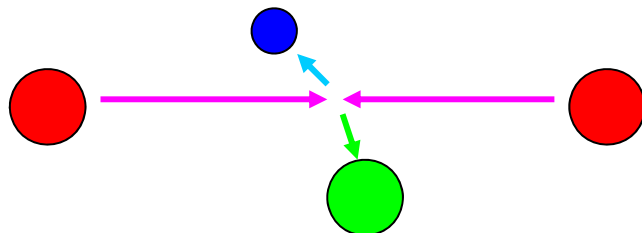
(ニュートリノを
毎秒**1000兆**個つくる)



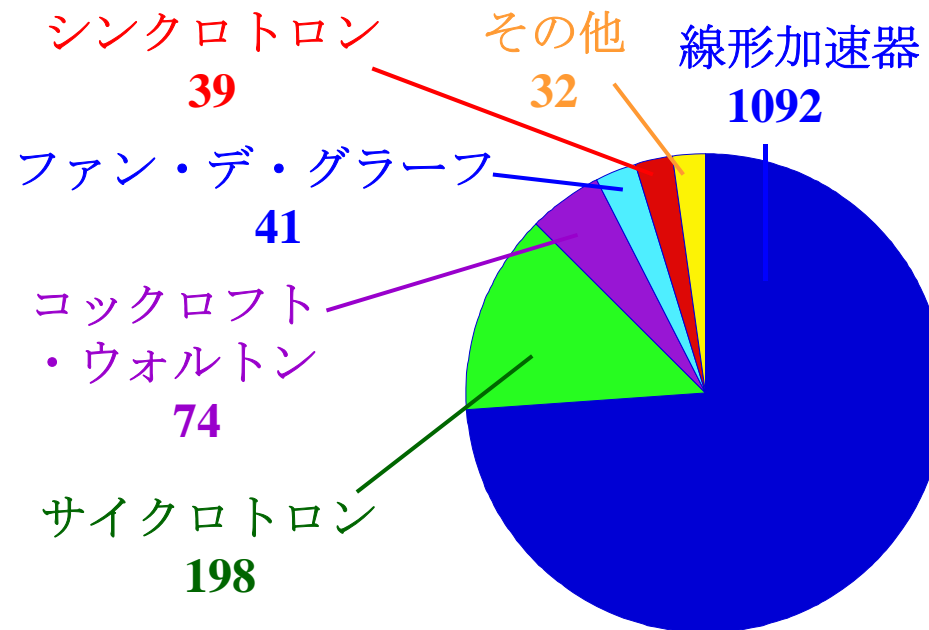
衝突型

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

超伝導加速空洞

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

超伝導加速空洞

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

超伝導加速空洞

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

超伝導加速空洞

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

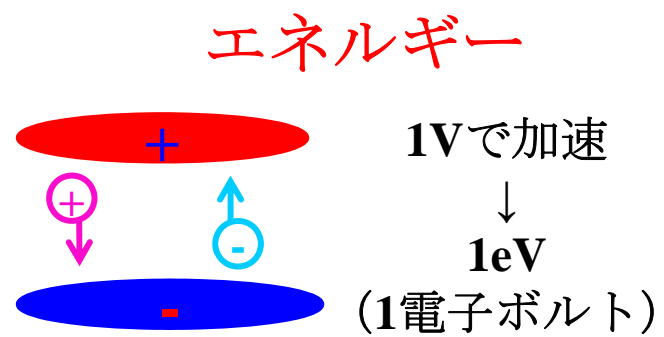
J-PARCの次世代ニュートリノビームラインは世界最高性能

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



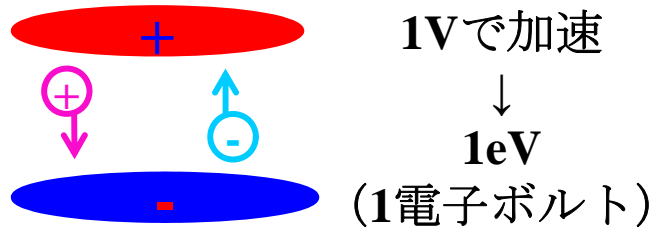
これからも、世界をリードして行きたい

加速器の性能



加速器の性能

エネルギー

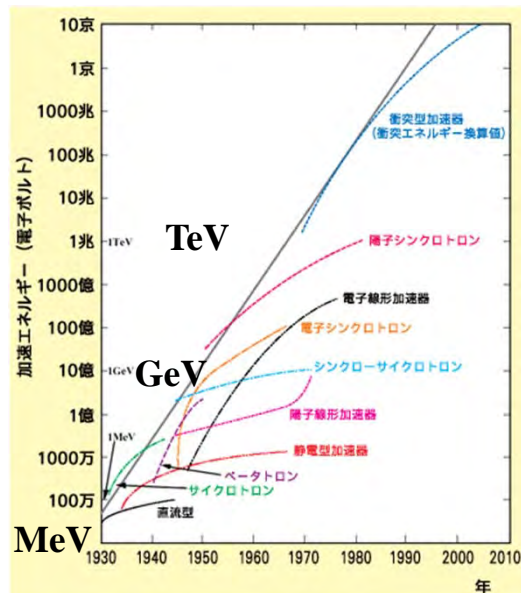


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

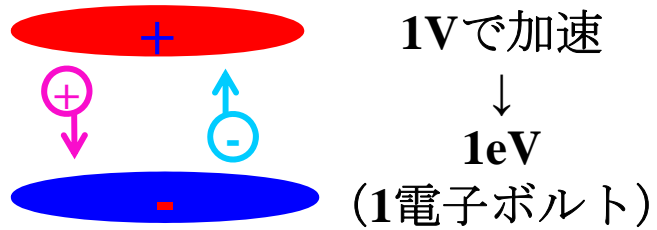
LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



加速器の性能

$$\text{エネルギー} \times \text{個数} = \text{パワー}$$

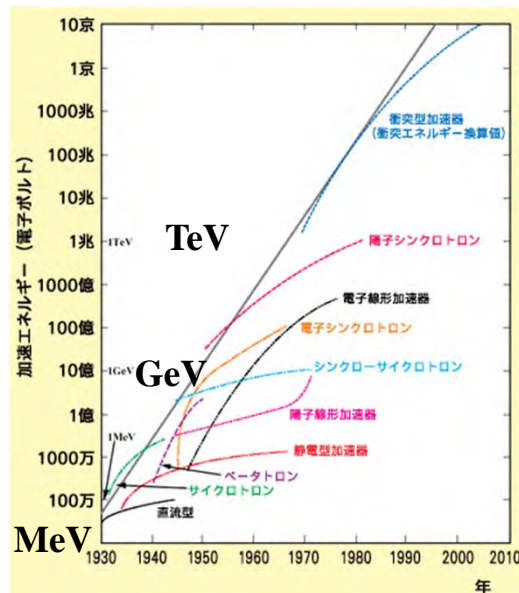


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

LHC : 7 TeV + 7 TeV

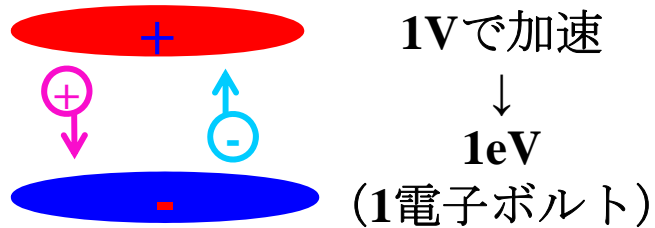
ILC : 250 GeV + 250 GeV



加速器の性能

$$\text{エネルギー} \times \text{個数} = \text{パワー}$$

J-PARC : 1MW

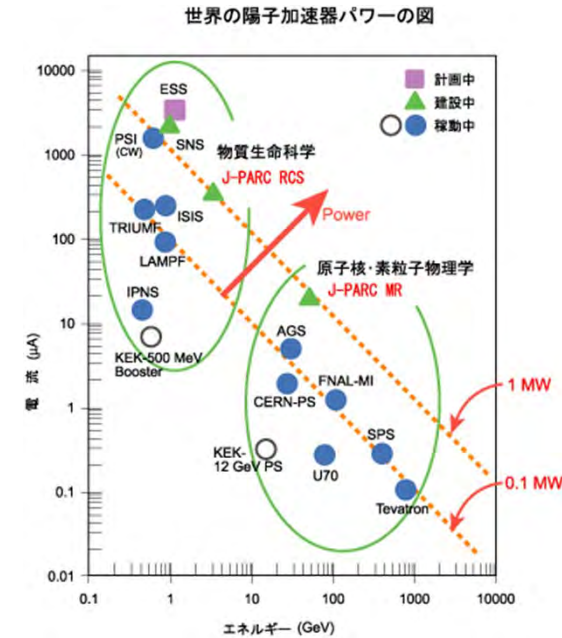
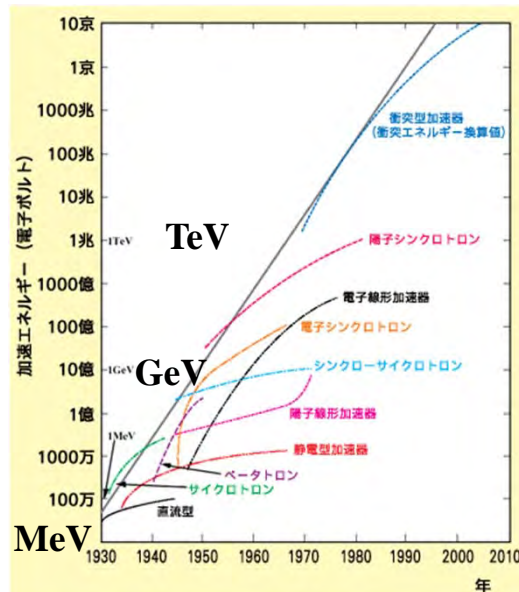


J-PARC : 50 GeV

KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

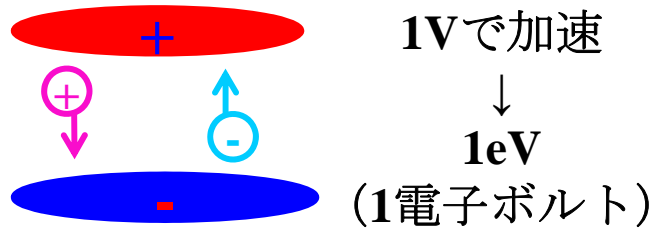
LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



加速器の性能

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

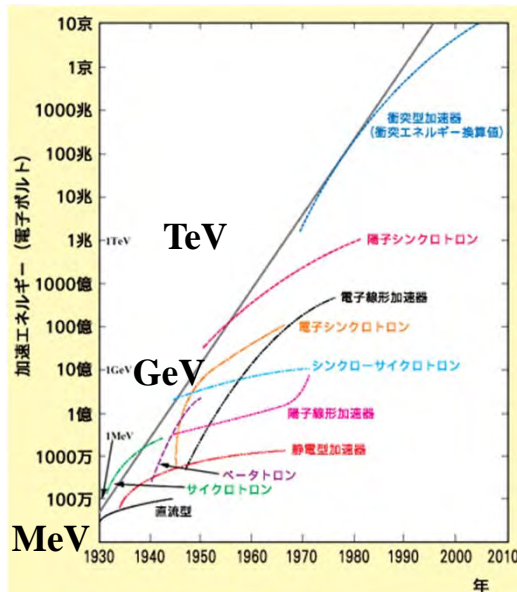


J-PARC : 50 GeV

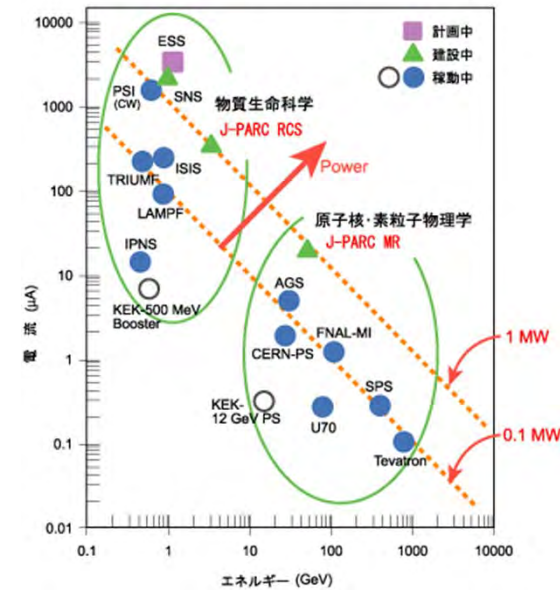
KEKB : 3.5 GeV + 8 GeV

LHC : 7 TeV + 7 TeV

ILC : 250 GeV + 250 GeV



世界の陽子加速器パワーの図



J-PARC

総工費1,500億円、史上最大のプロジェクト

参加企業

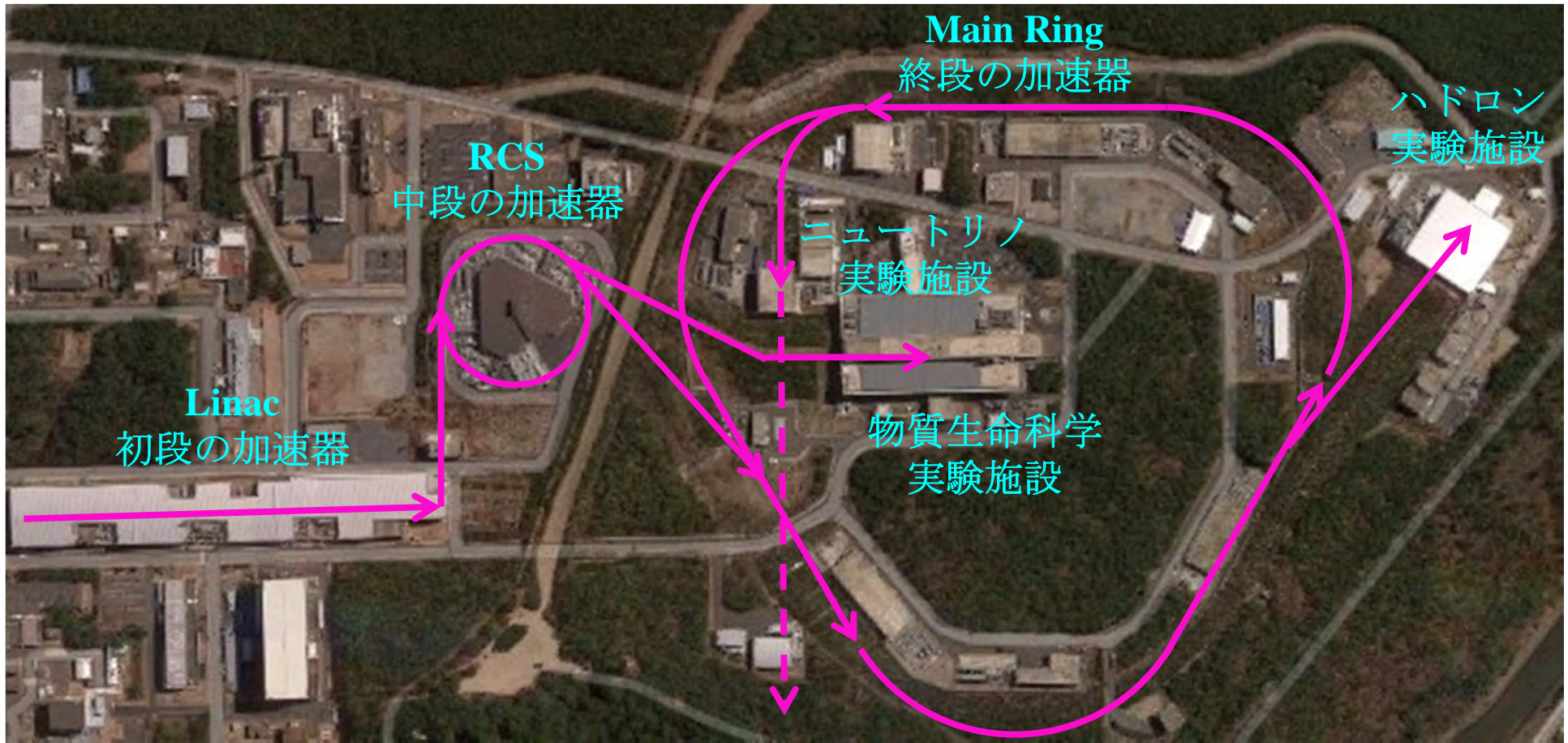
土木建築：スーパーゼネコンの全て＋
準大手の半数

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

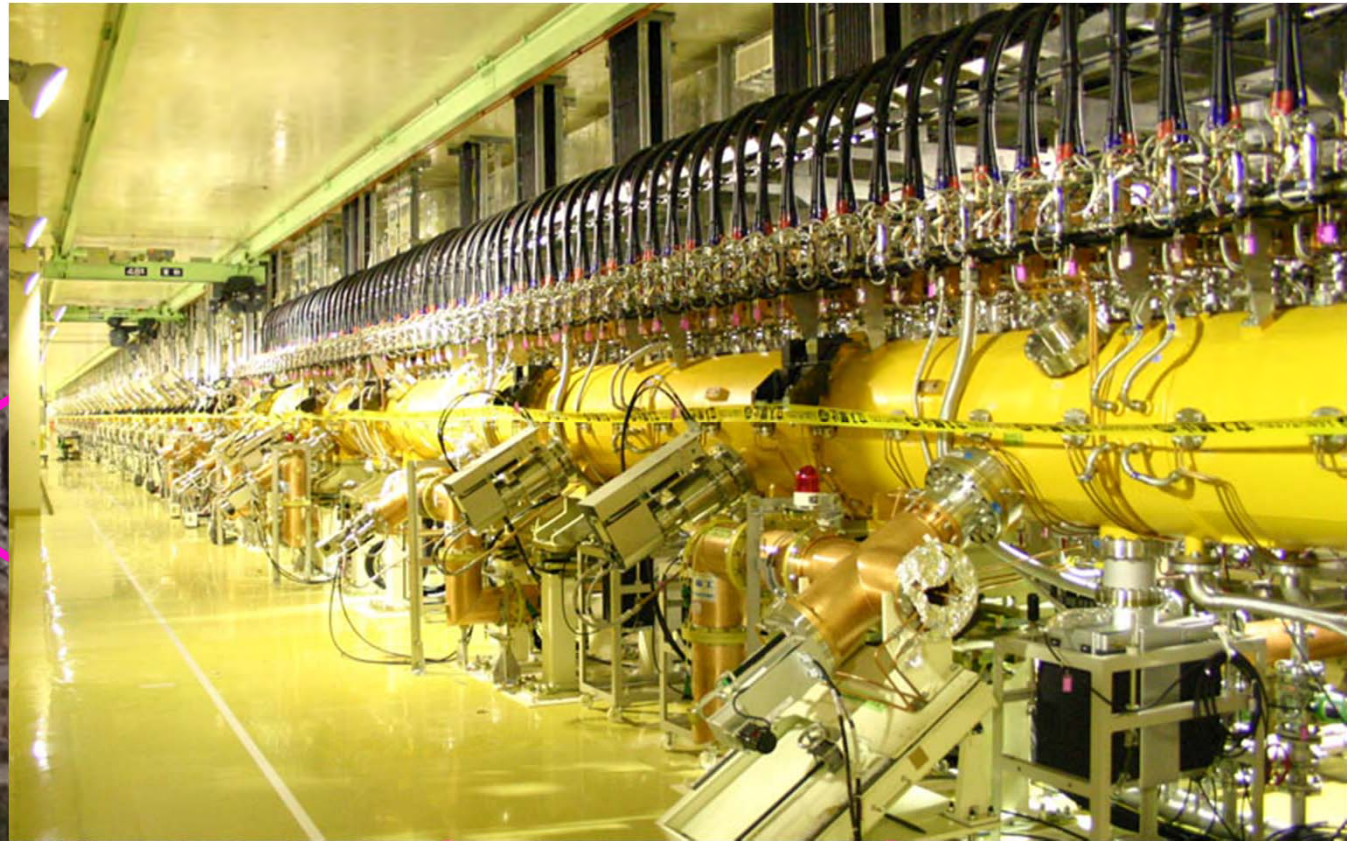


Japan Proton Accelerator Research Complex
標的が複数ある複合実験施設

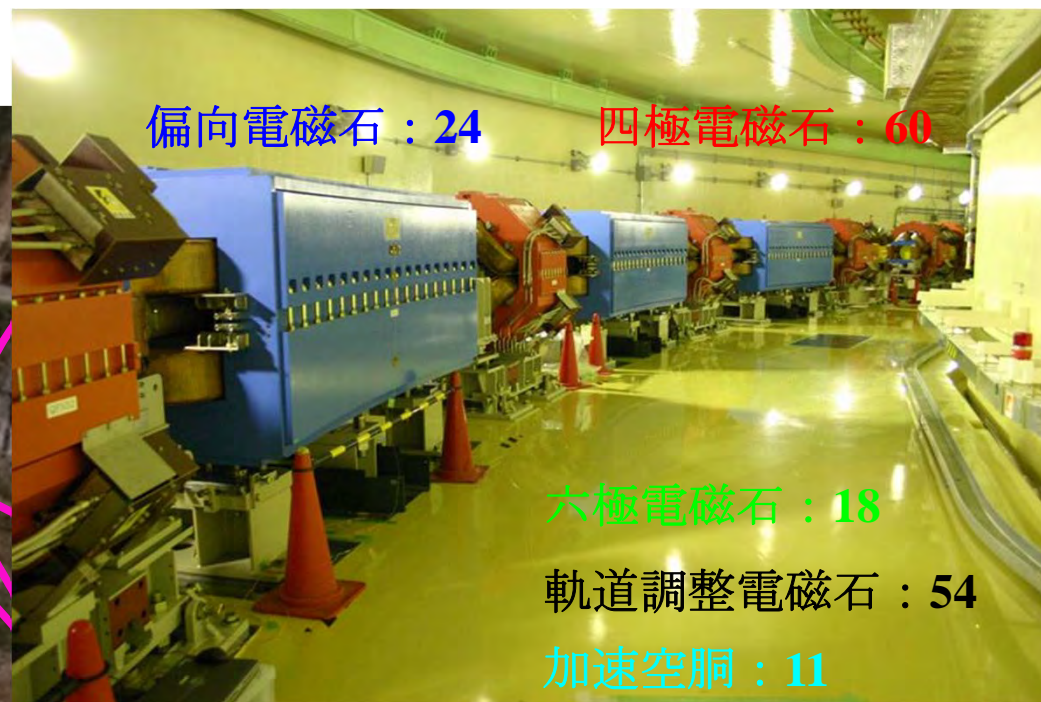
Linac



Linac
初段の加速器



RCS



Main Ring

四極電磁石 : 216

六極電磁石 : 72

偏向電磁石 : 96

軌道調整電磁石 : 186

加速空洞 : 9

8 バンチ + 1 空バンチ

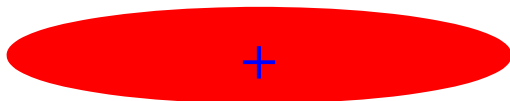
Main Ring
終段の加速器

0.4 Hz -> 1 Hz

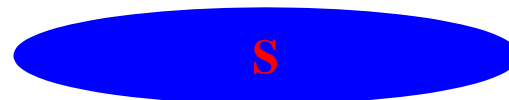
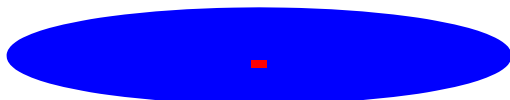


加速器の原理

電場

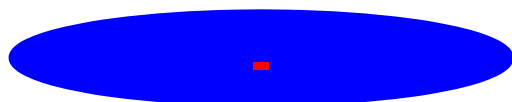
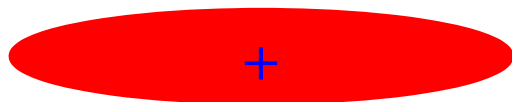


磁場

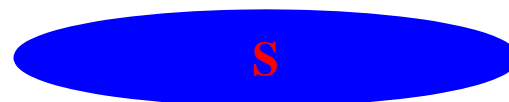


加速器の原理

電場

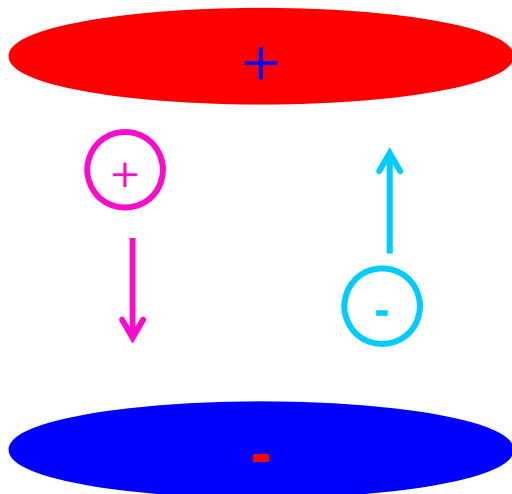


磁場

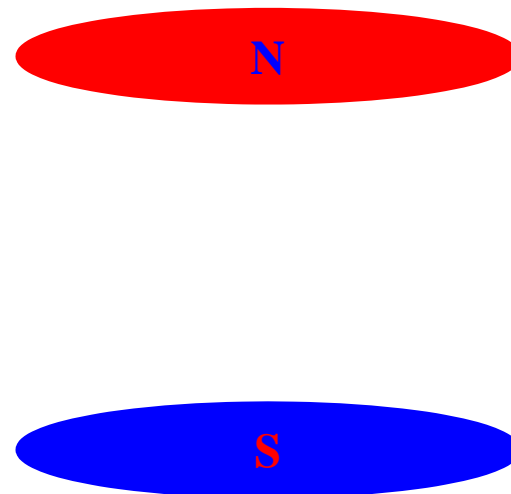


加速器の原理

電場

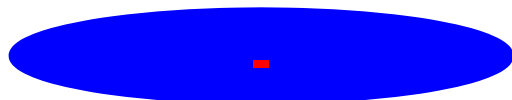
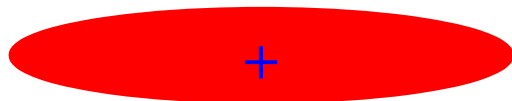


磁場



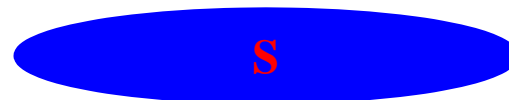
加速器の原理

電場



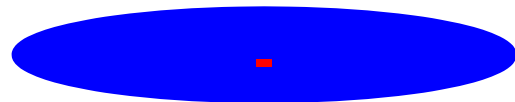
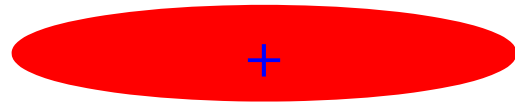
電場で加速する！

磁場



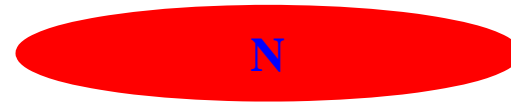
加速器の原理

電場

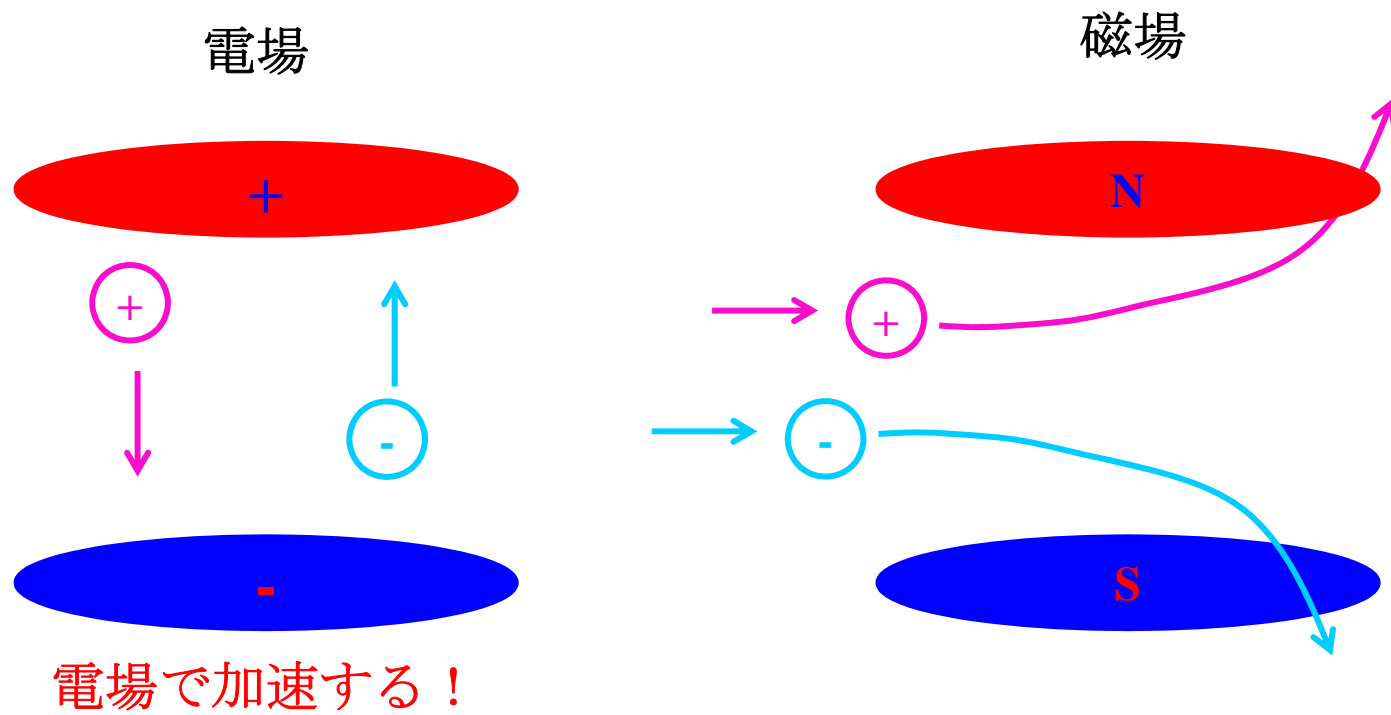


電場で加速する！

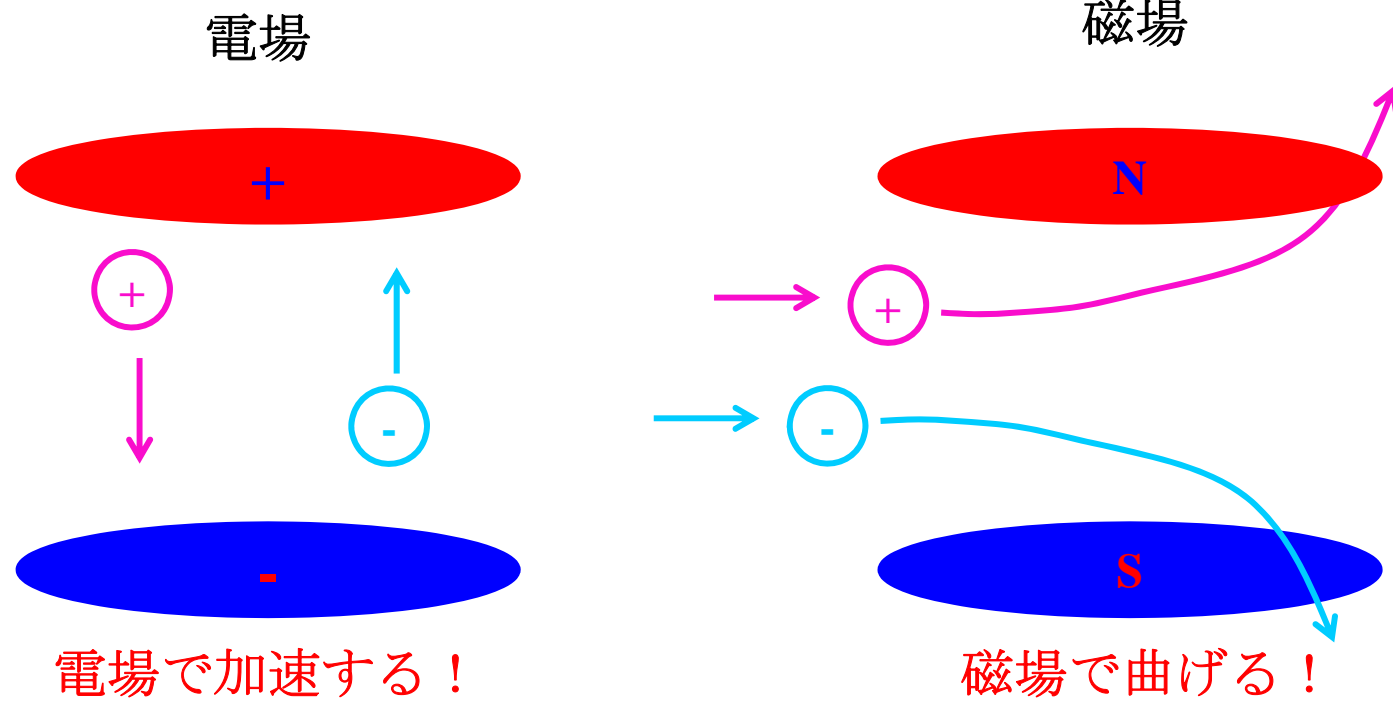
磁場



加速器の原理

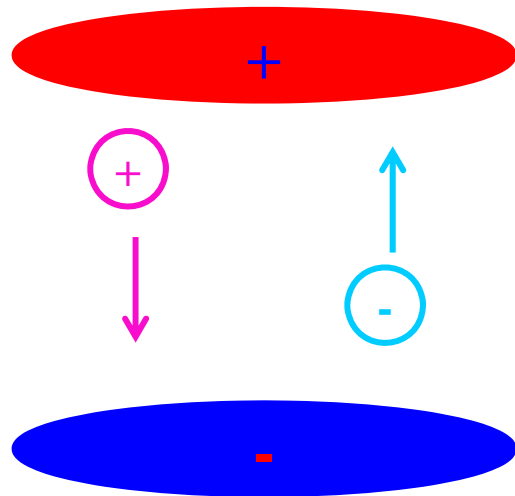


加速器の原理



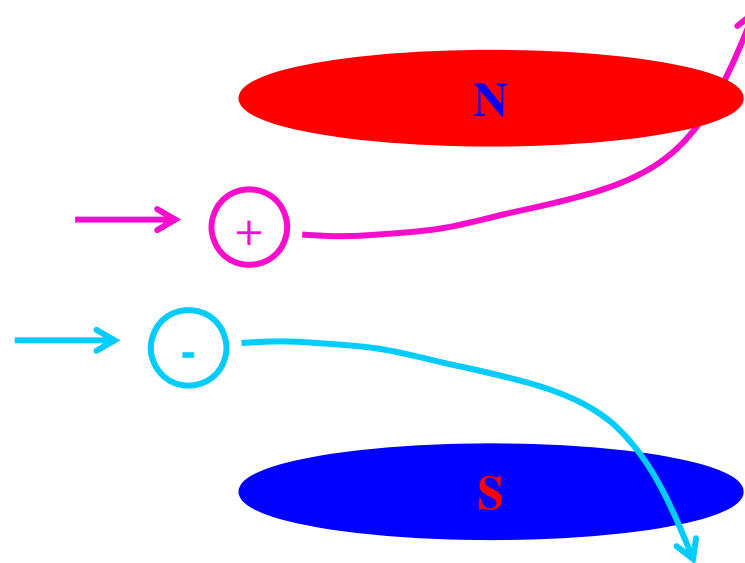
加速器の原理

電場

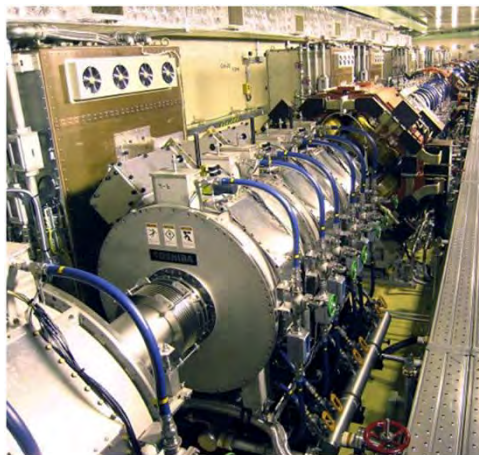


電場で加速する！

磁場



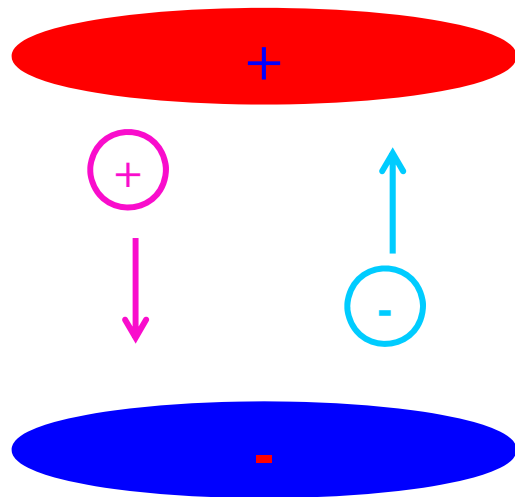
磁場で曲げる！



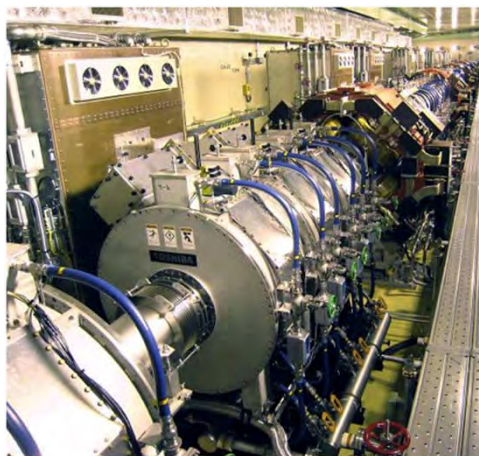
加速空洞

加速器の原理

電場

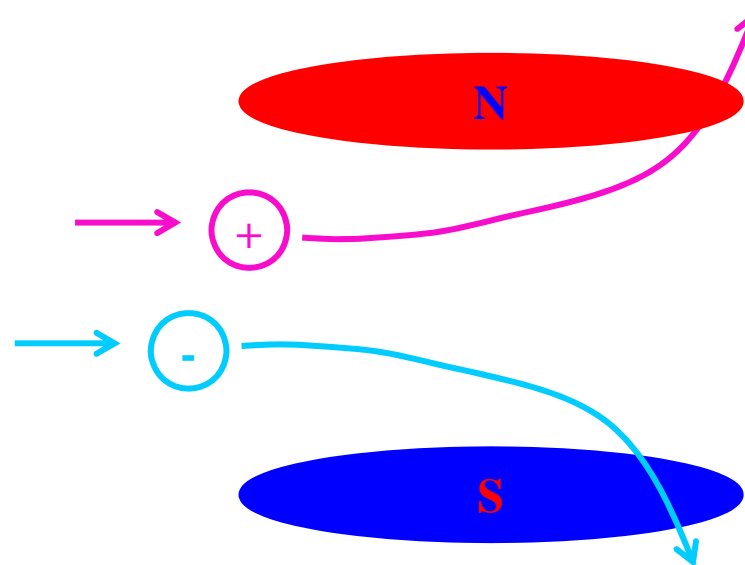


電場で加速する！



加速空洞

磁場

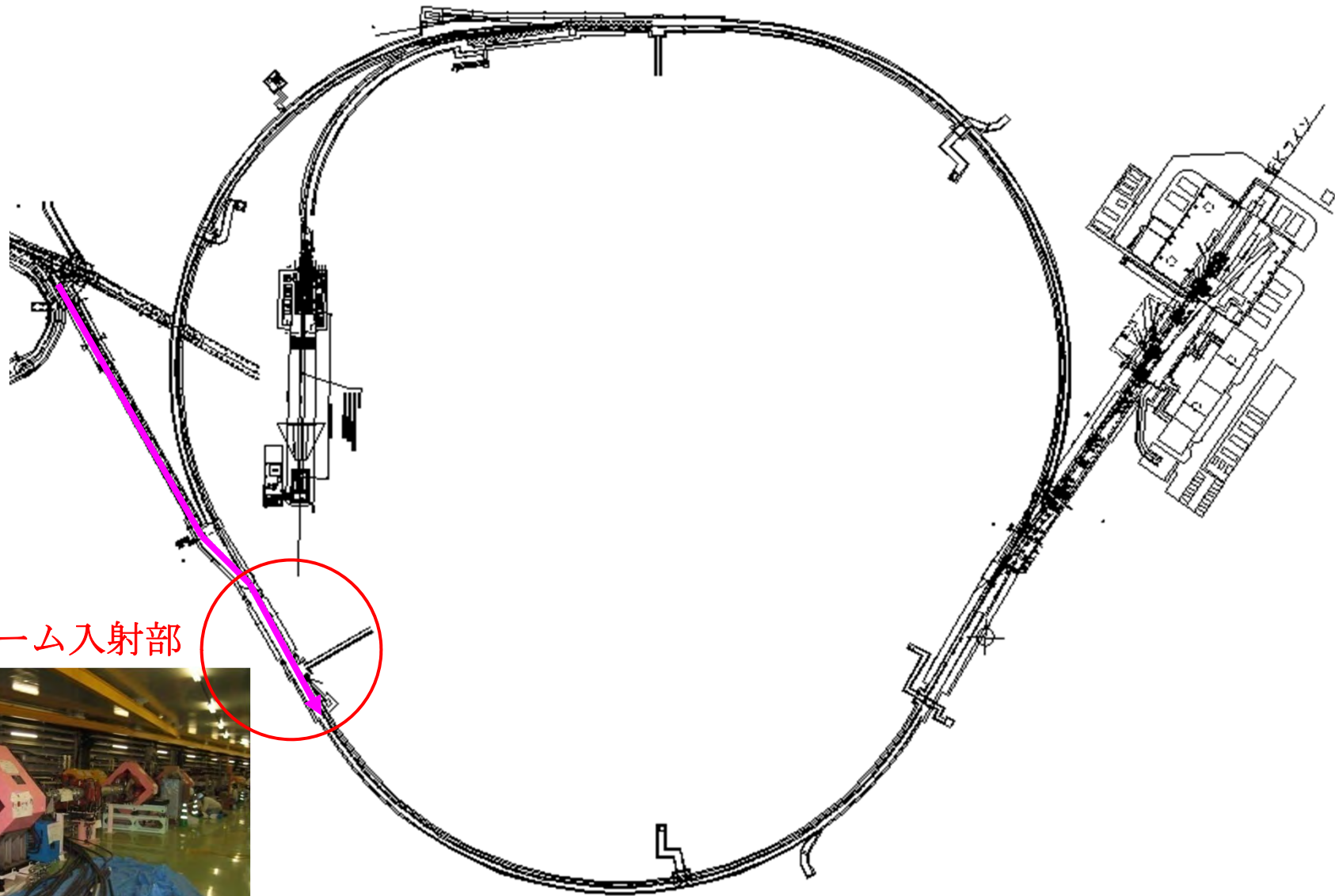


磁場で曲げる！

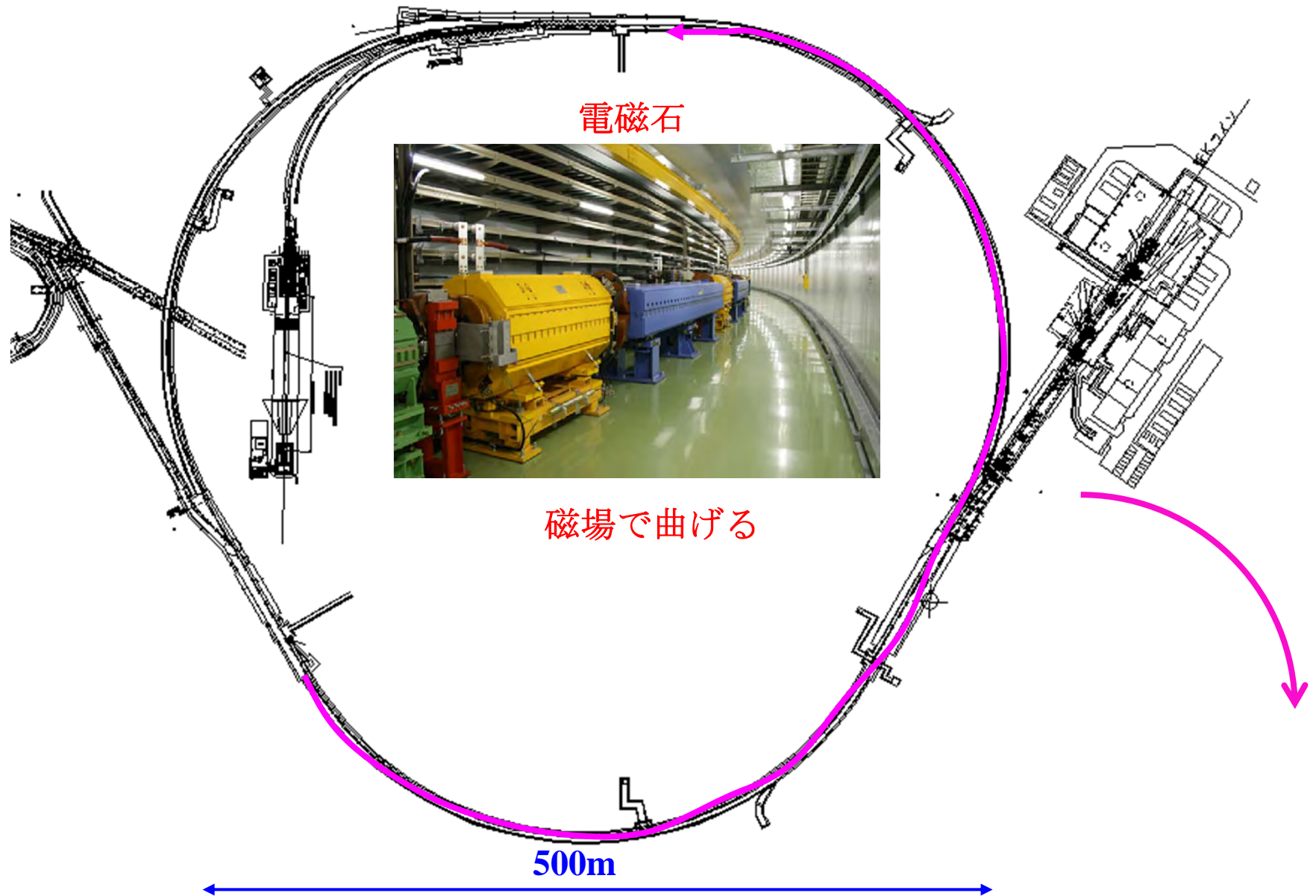


電磁石

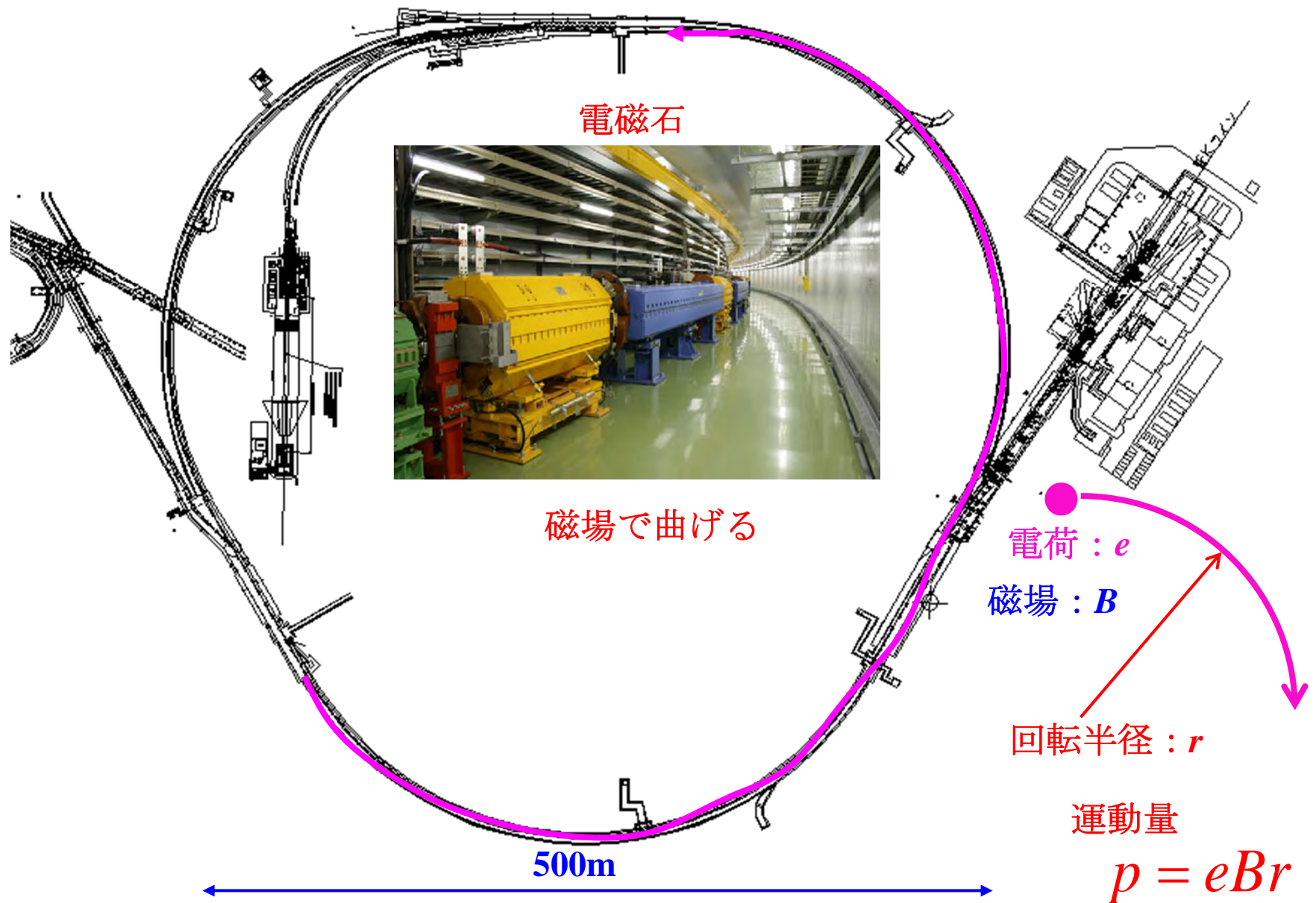
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



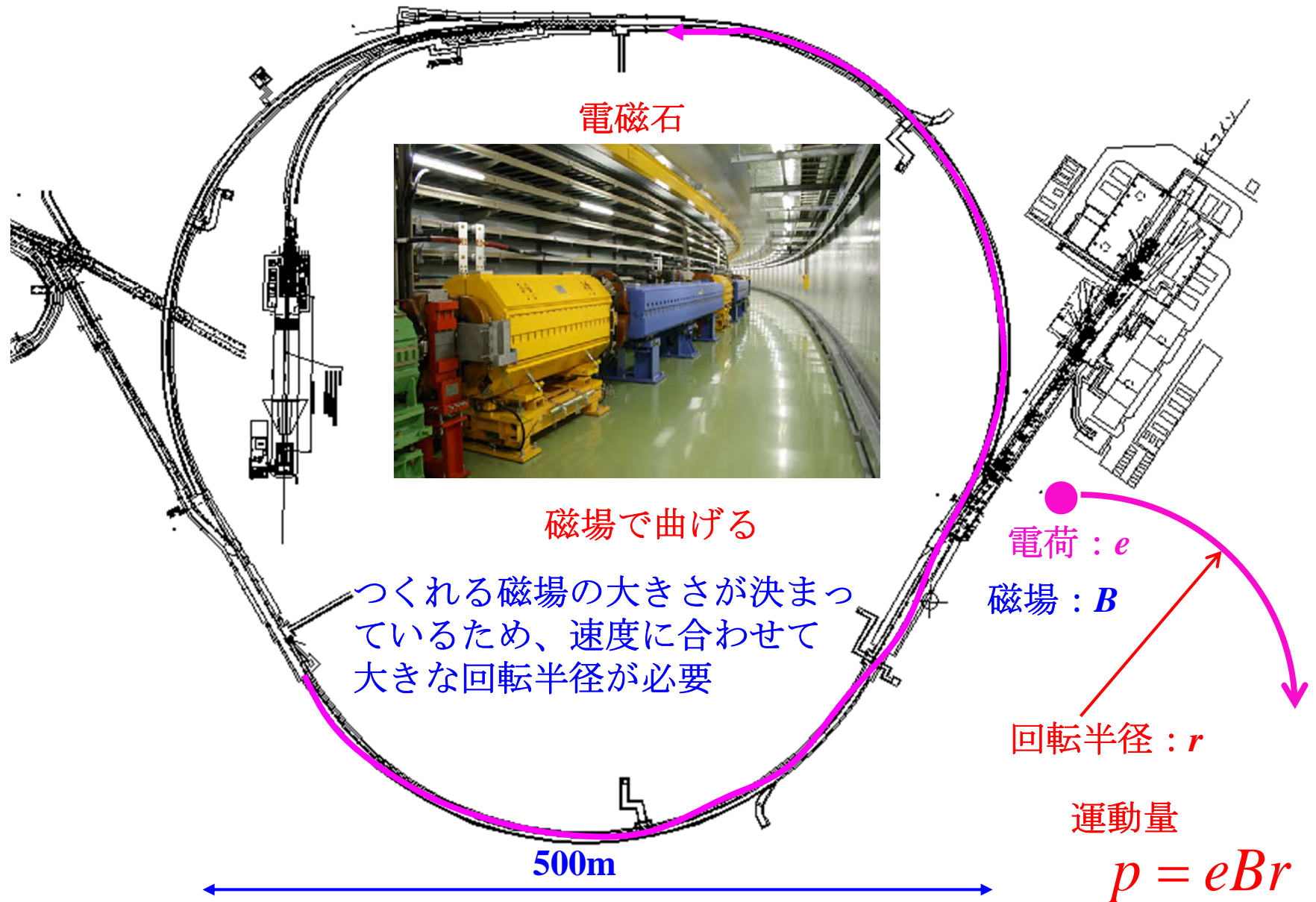
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



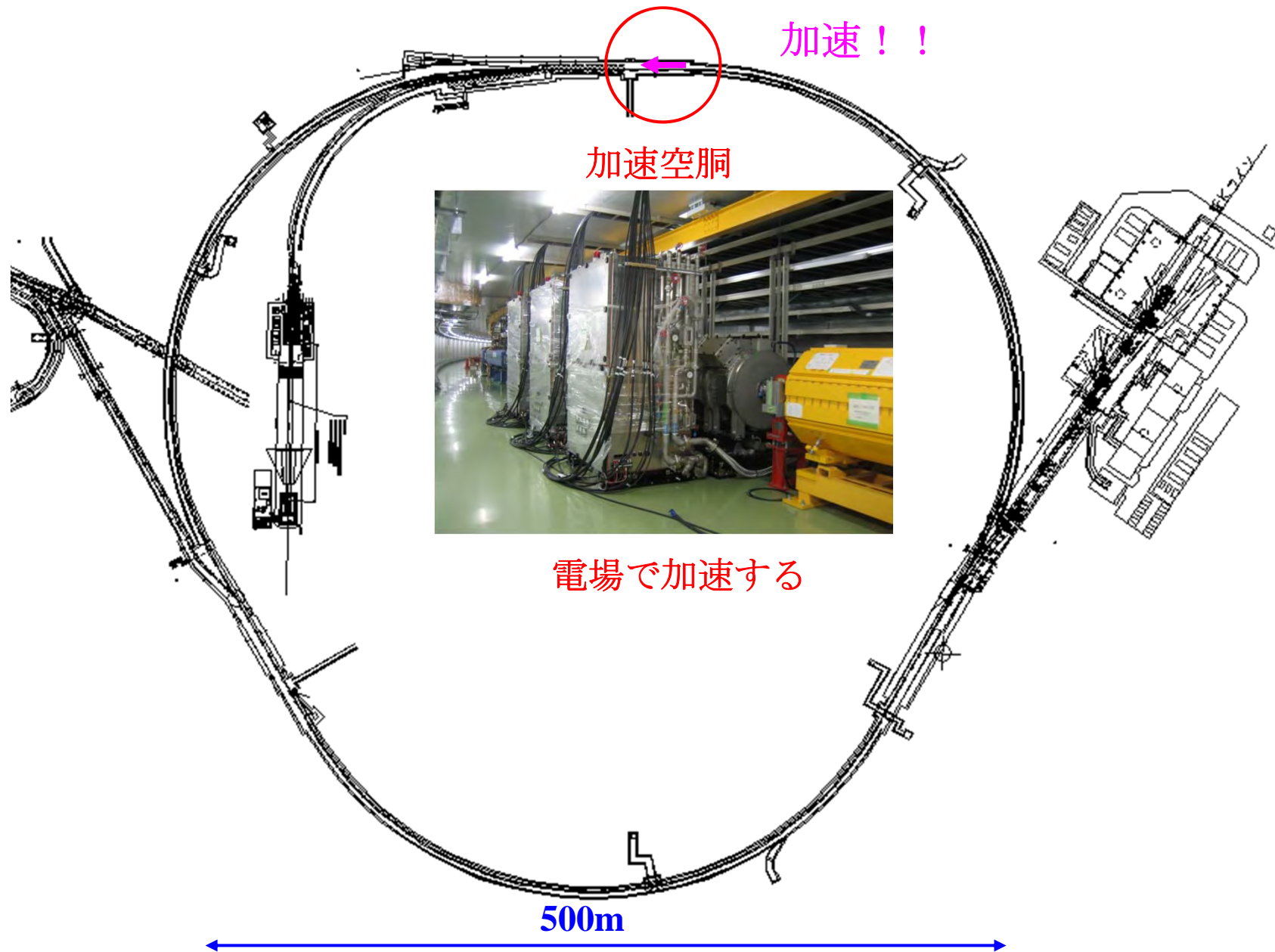
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



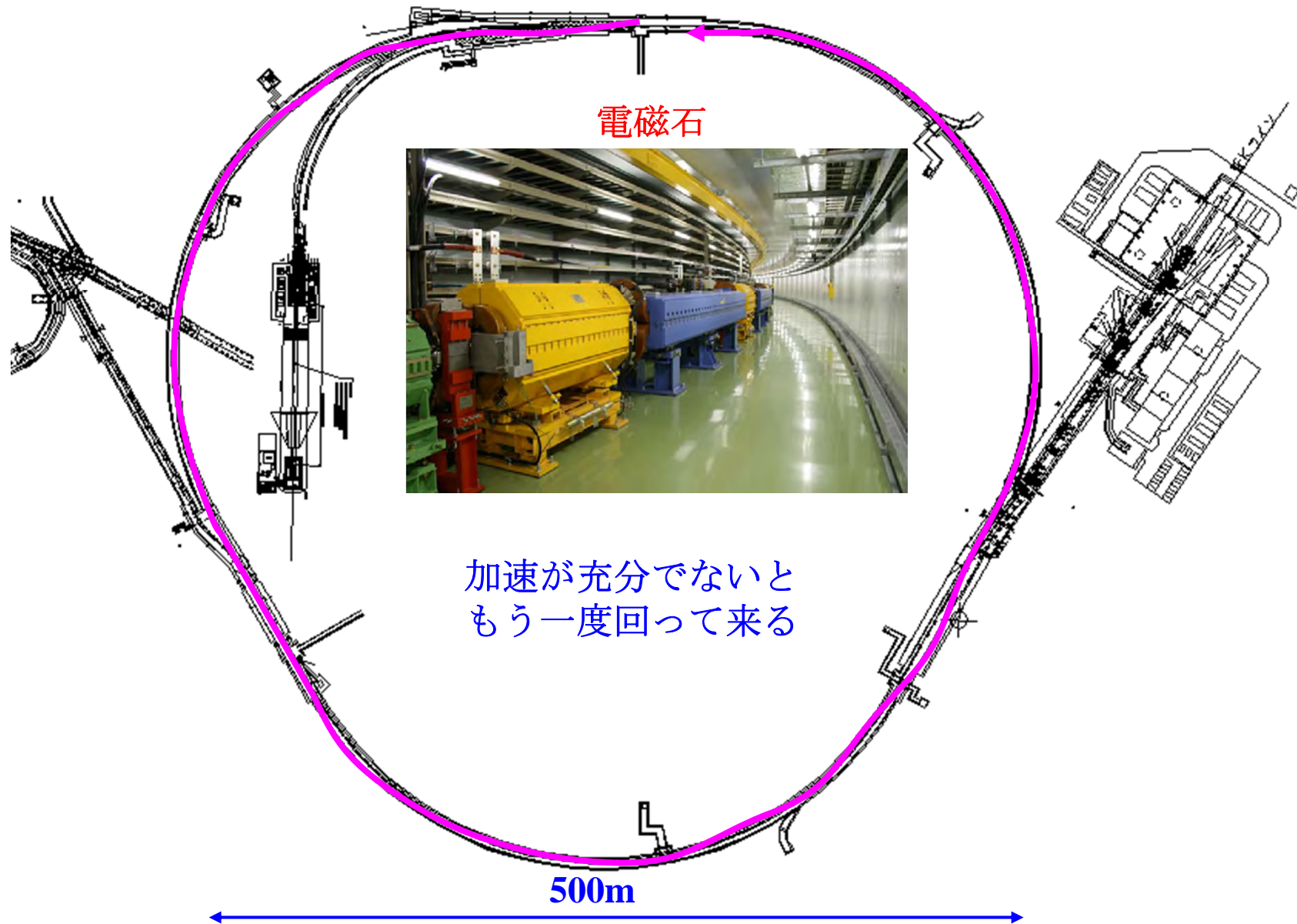
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



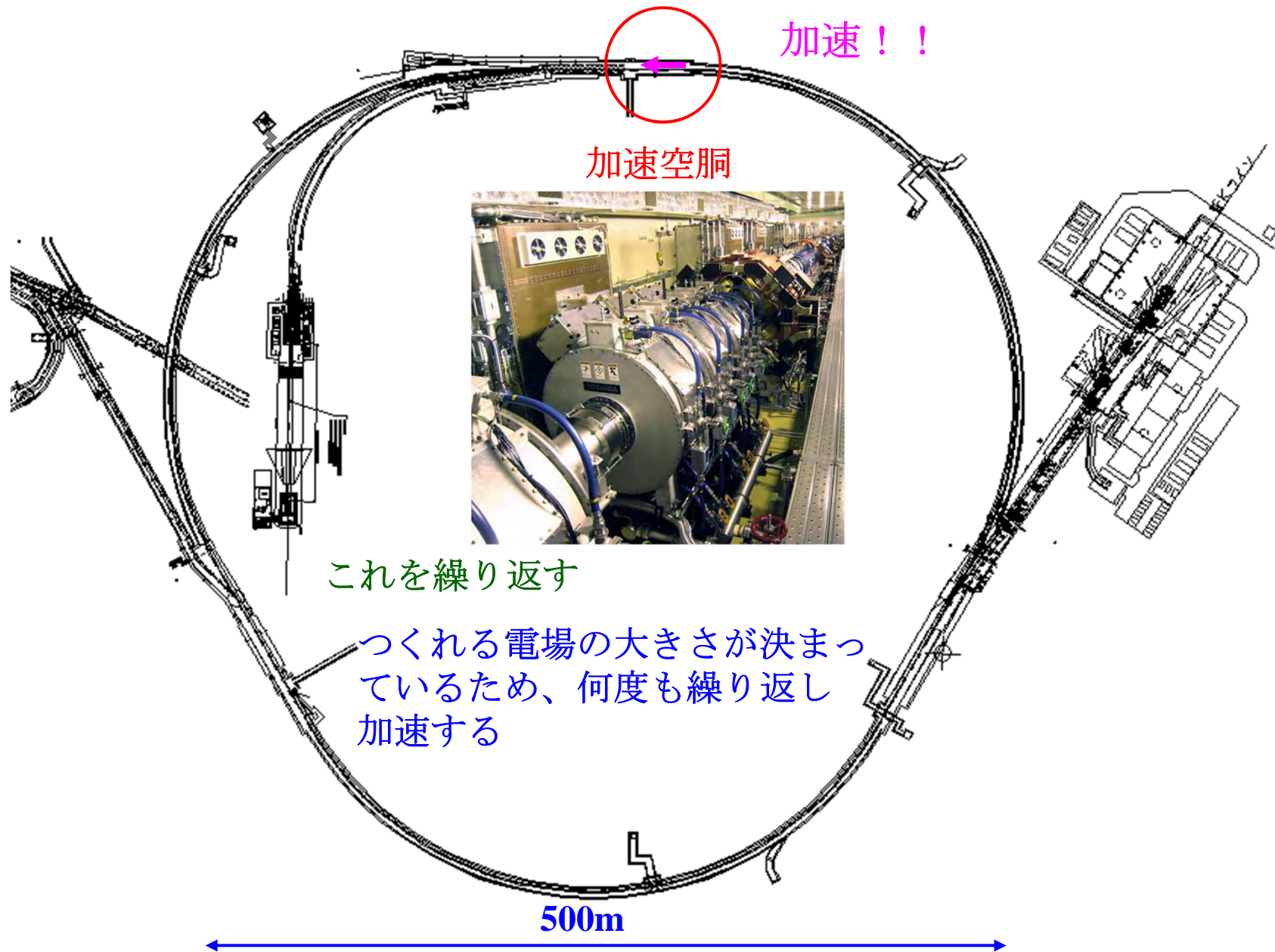
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



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）

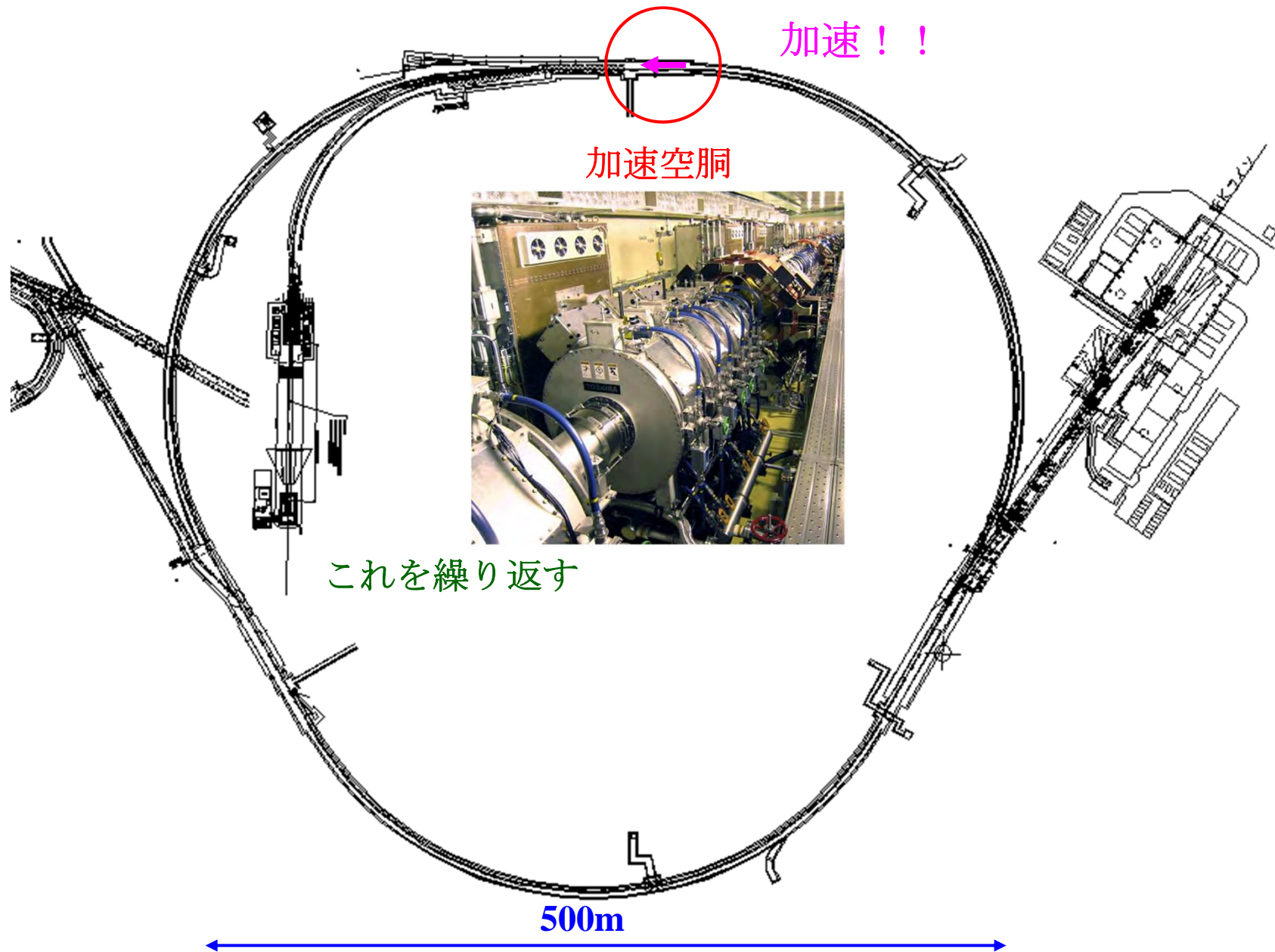


あれ？

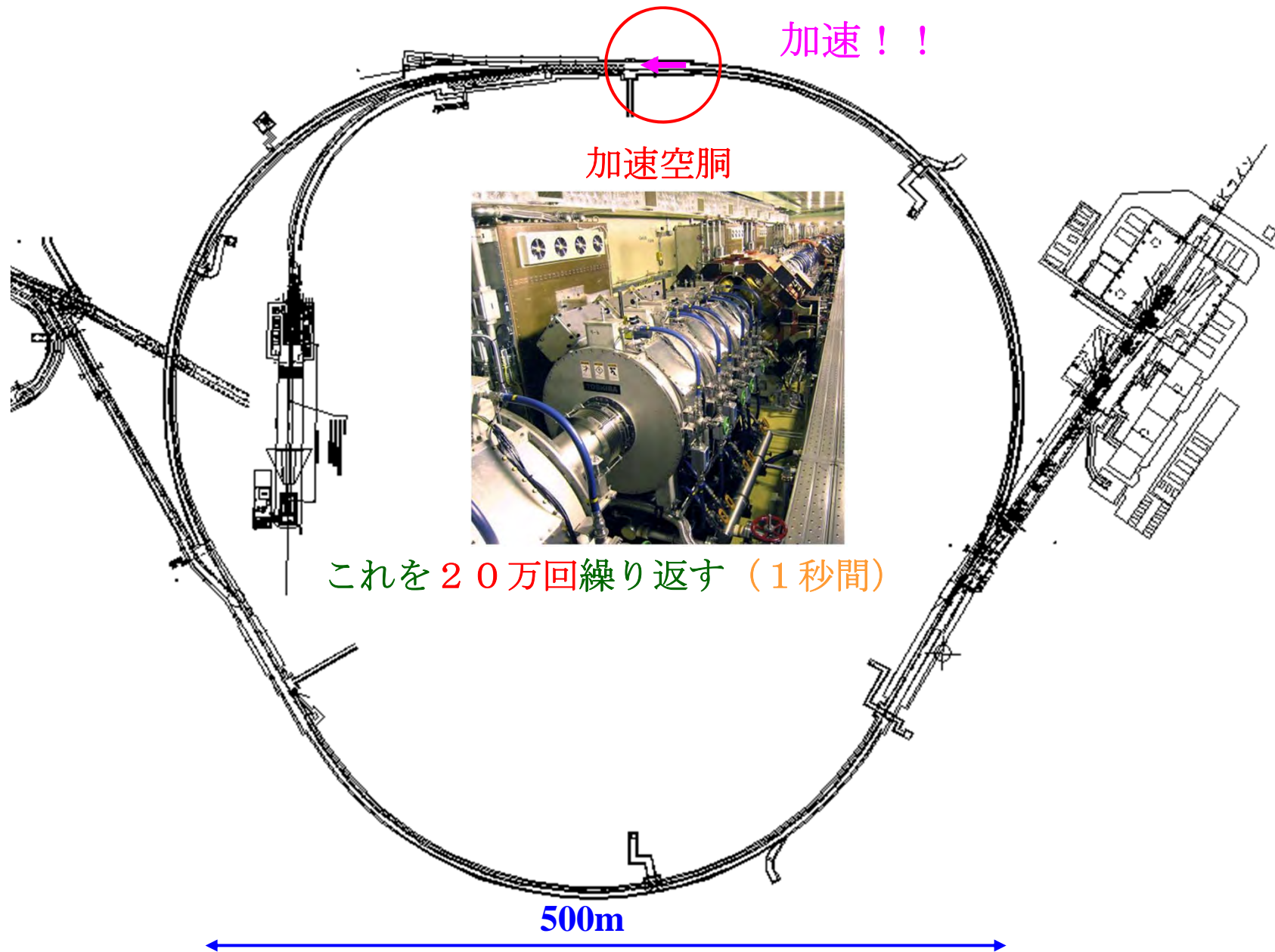
あれ？

これって、ほとんど加速してないんじゃあ、、

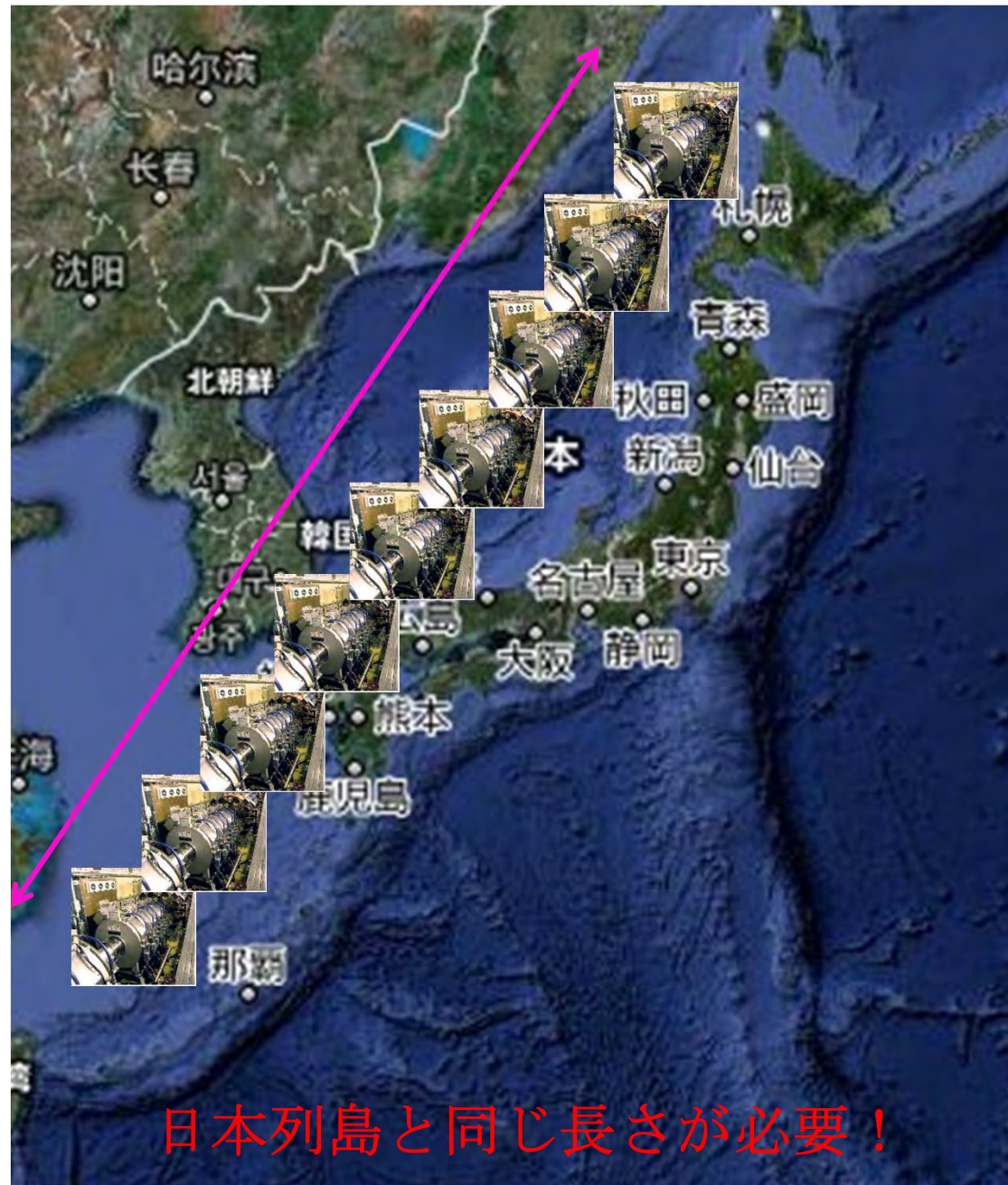
加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）

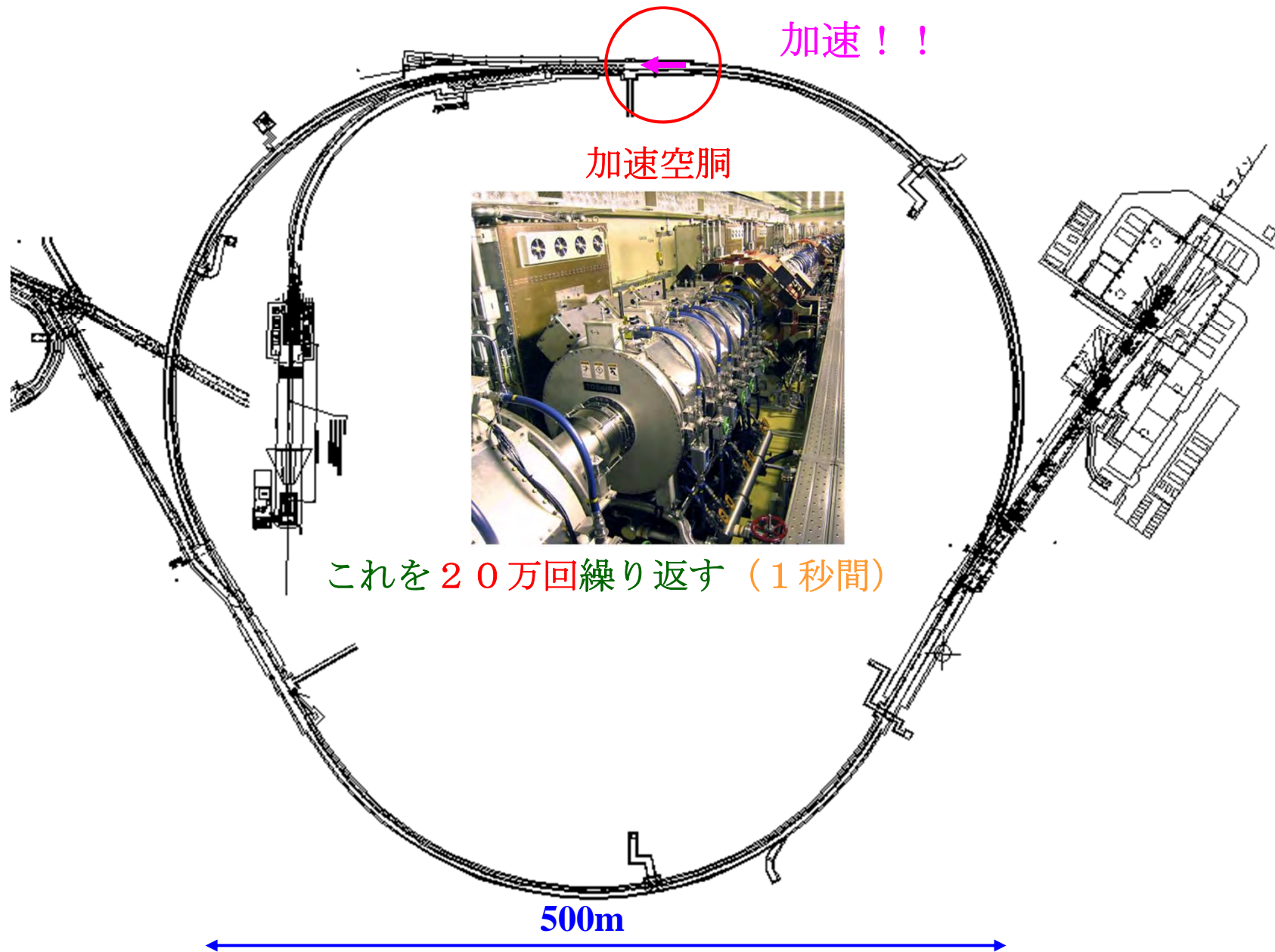


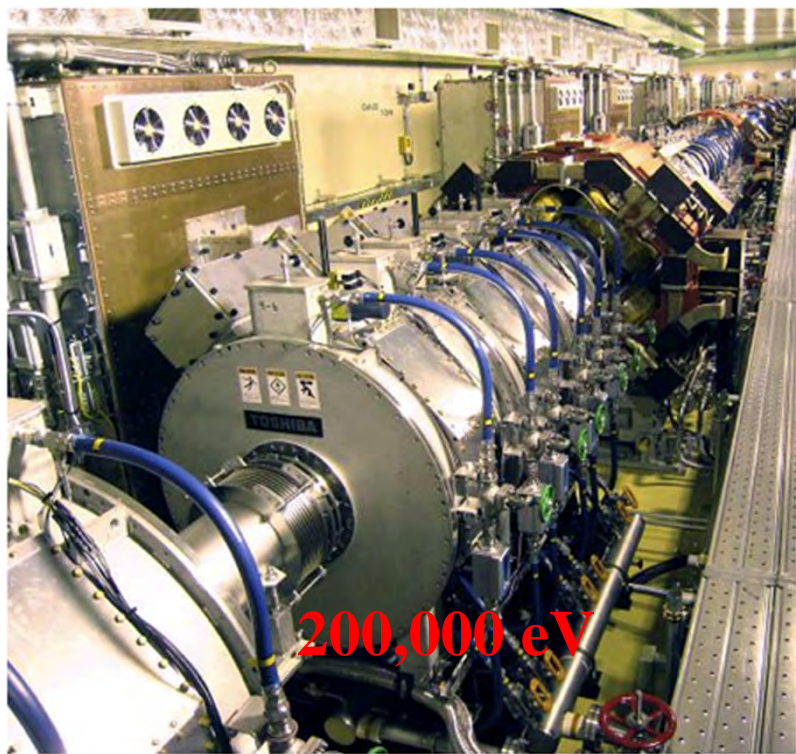
もし加速空洞だけだったら、



日本列島と同じ長さが必要！

加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）





Main Ring

30,000,000,000 eV

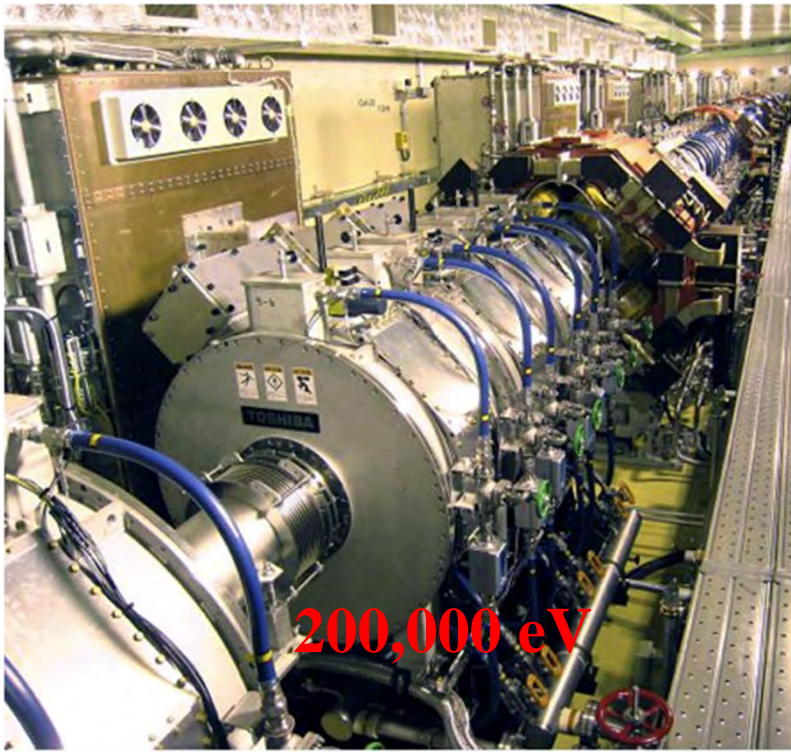
8 バンチ + 1 空バンチ

Main Ring
終段の加速器

0.4 Hz -> 1 Hz

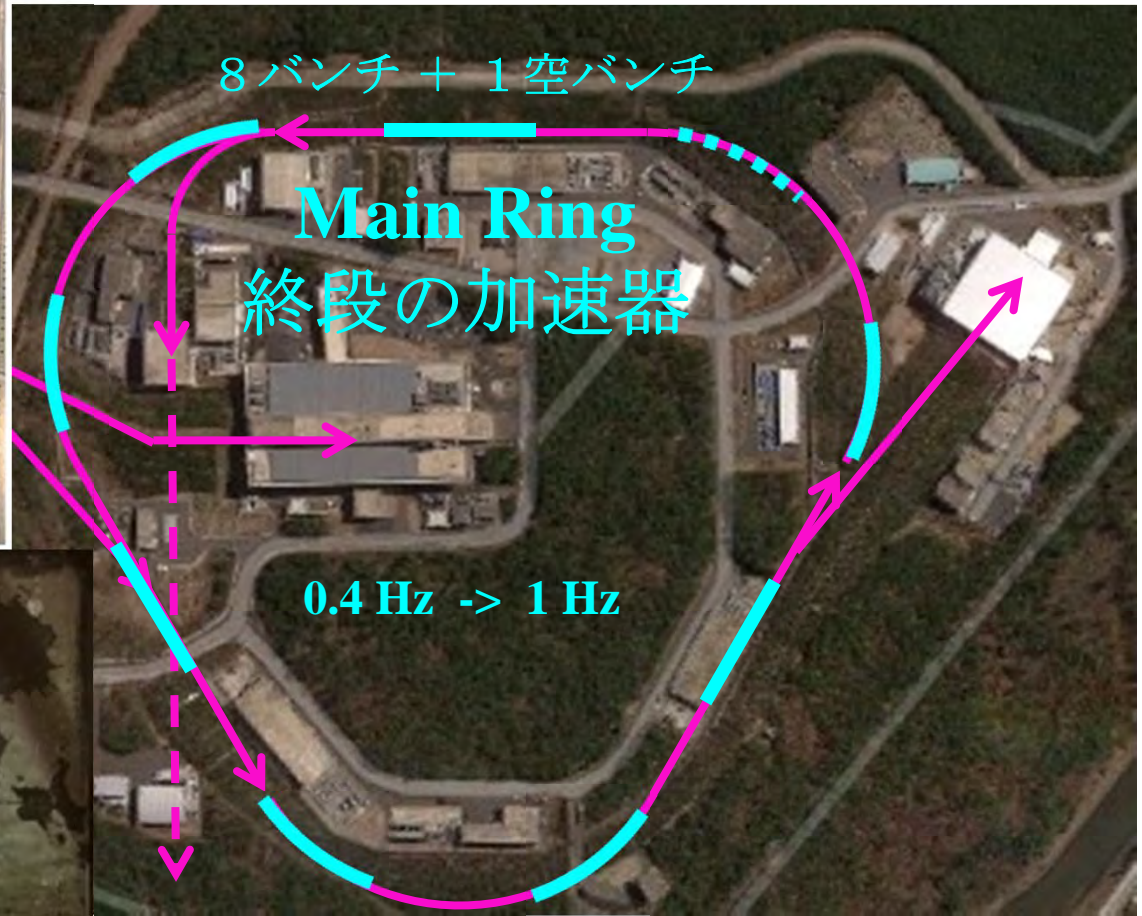


加速空洞

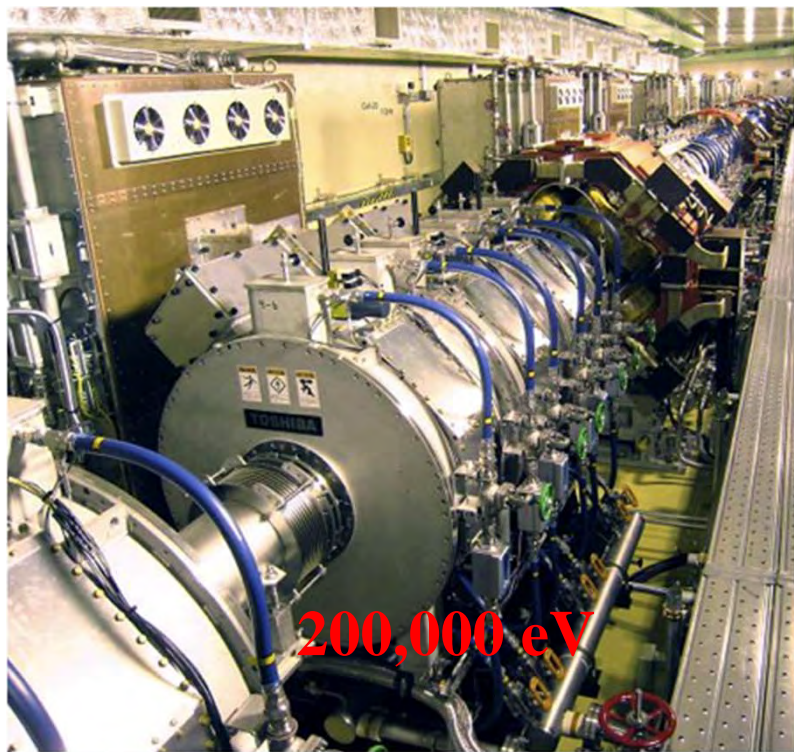


Main Ring

30,000,000,000 eV



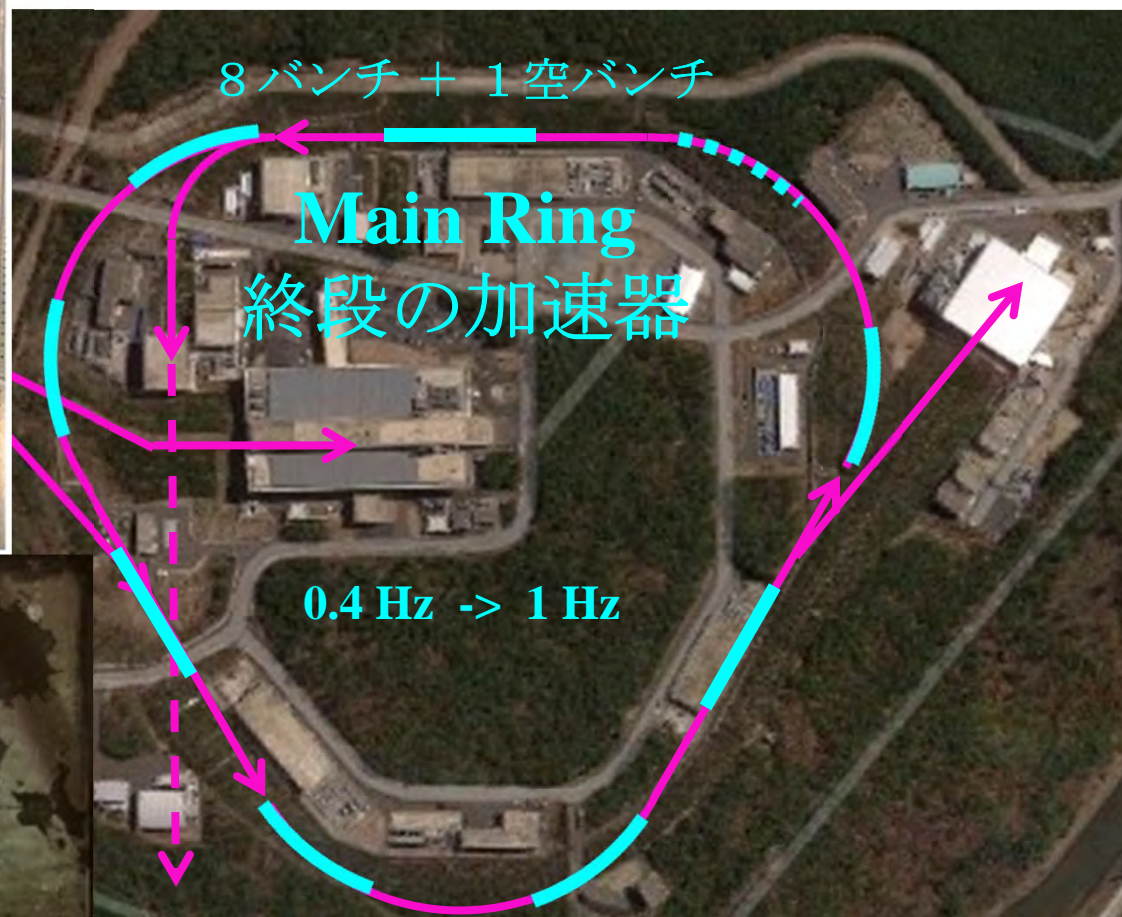
加速空洞



Main Ring

30,000,000,000 eV

200,000 eV

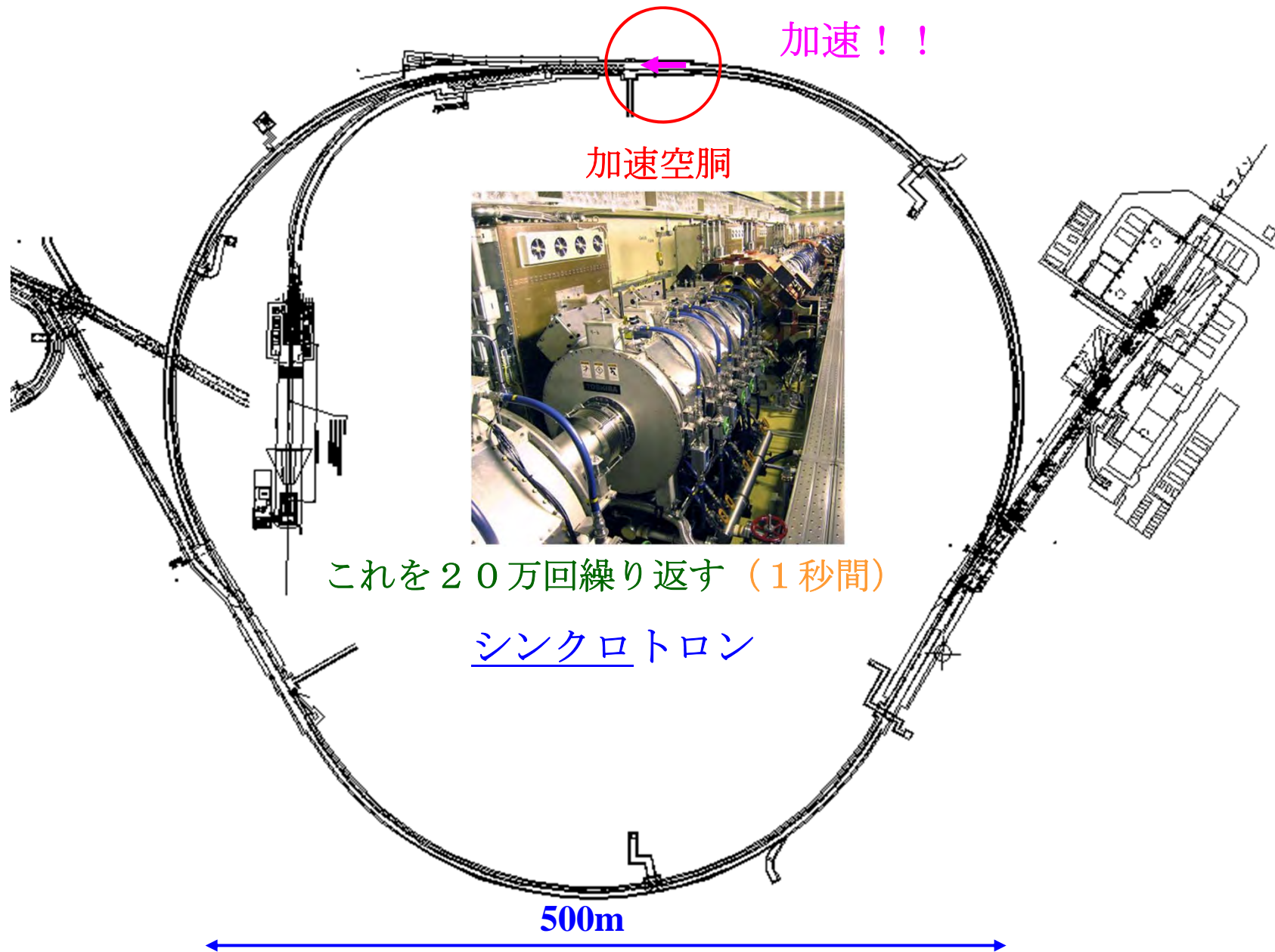


加速空洞

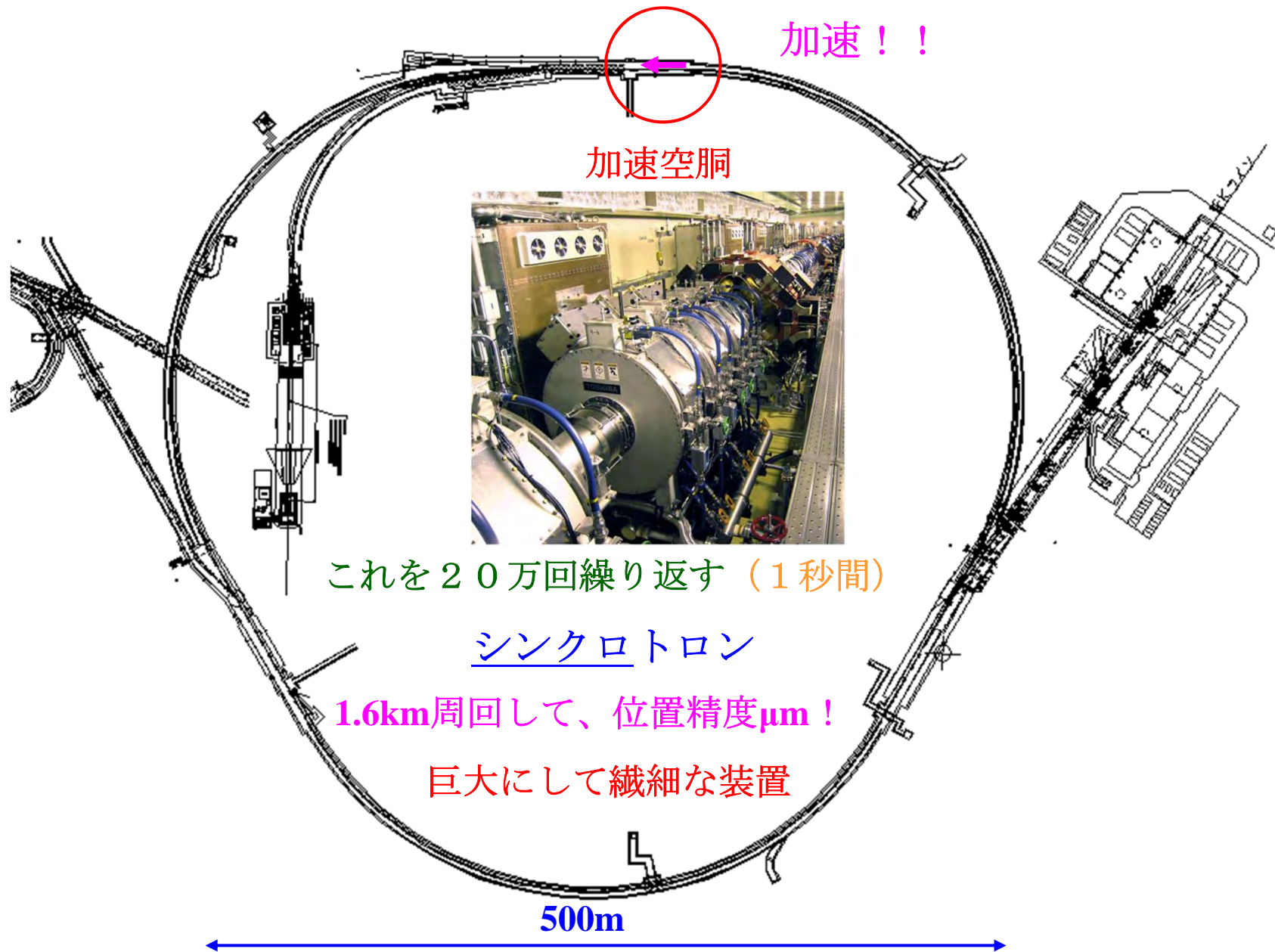


2,000,000回／秒
のブランコを
200,000×9回

加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）

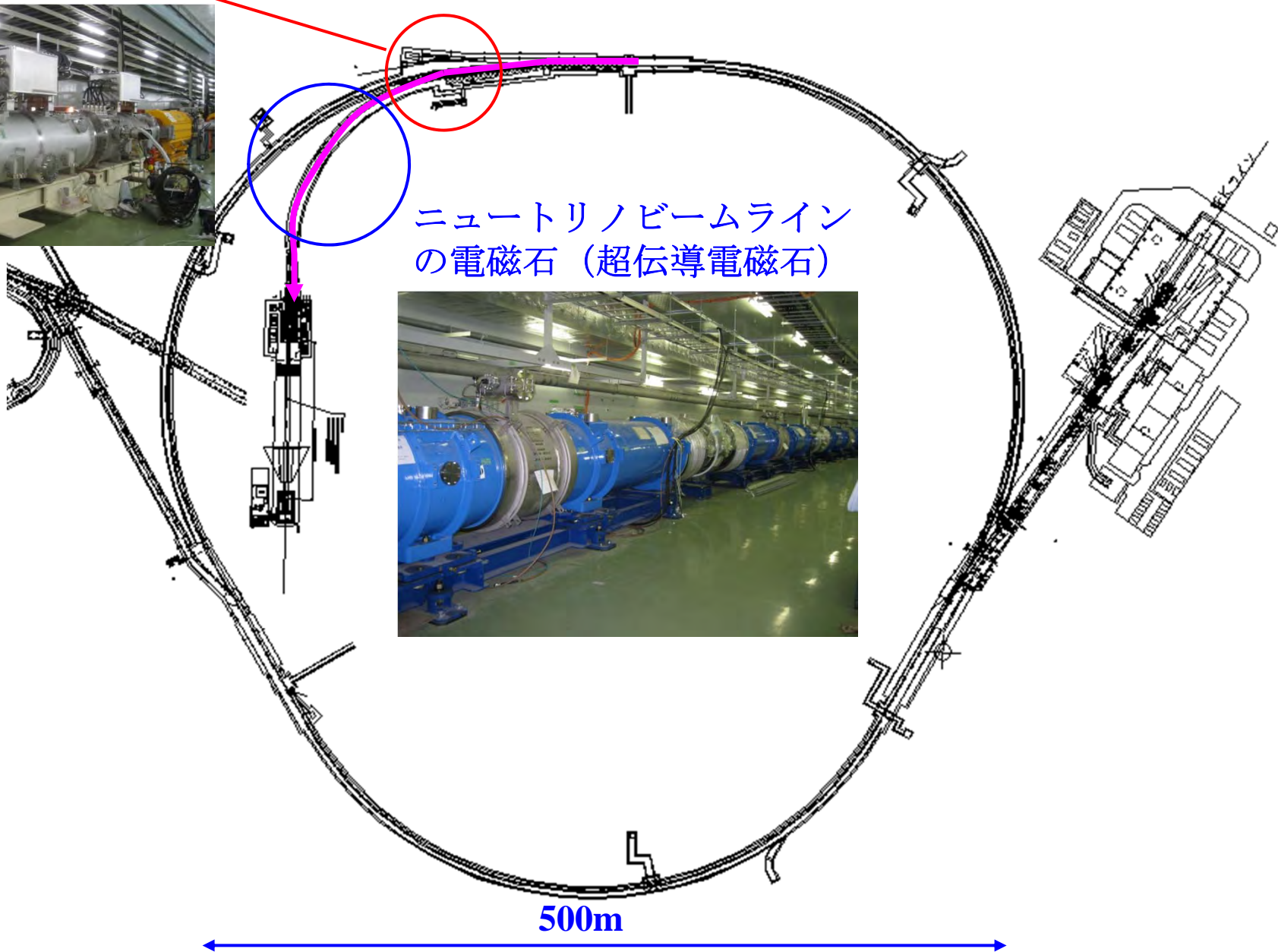


加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



加速器の例 (シンクロトロン、J-PARC)

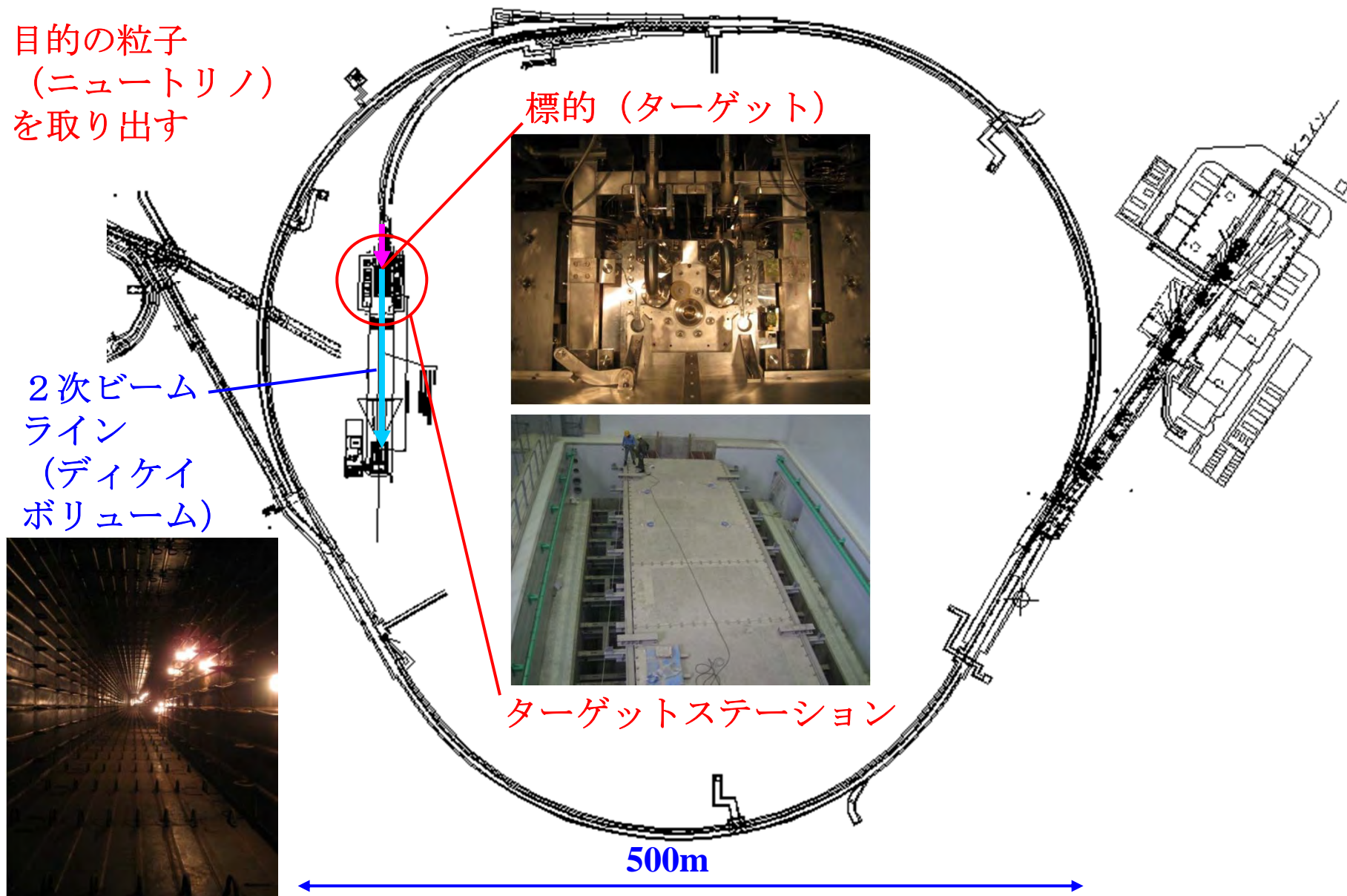
ビーム取出部



ニュートリノビームライン
の電磁石 (超伝導電磁石)

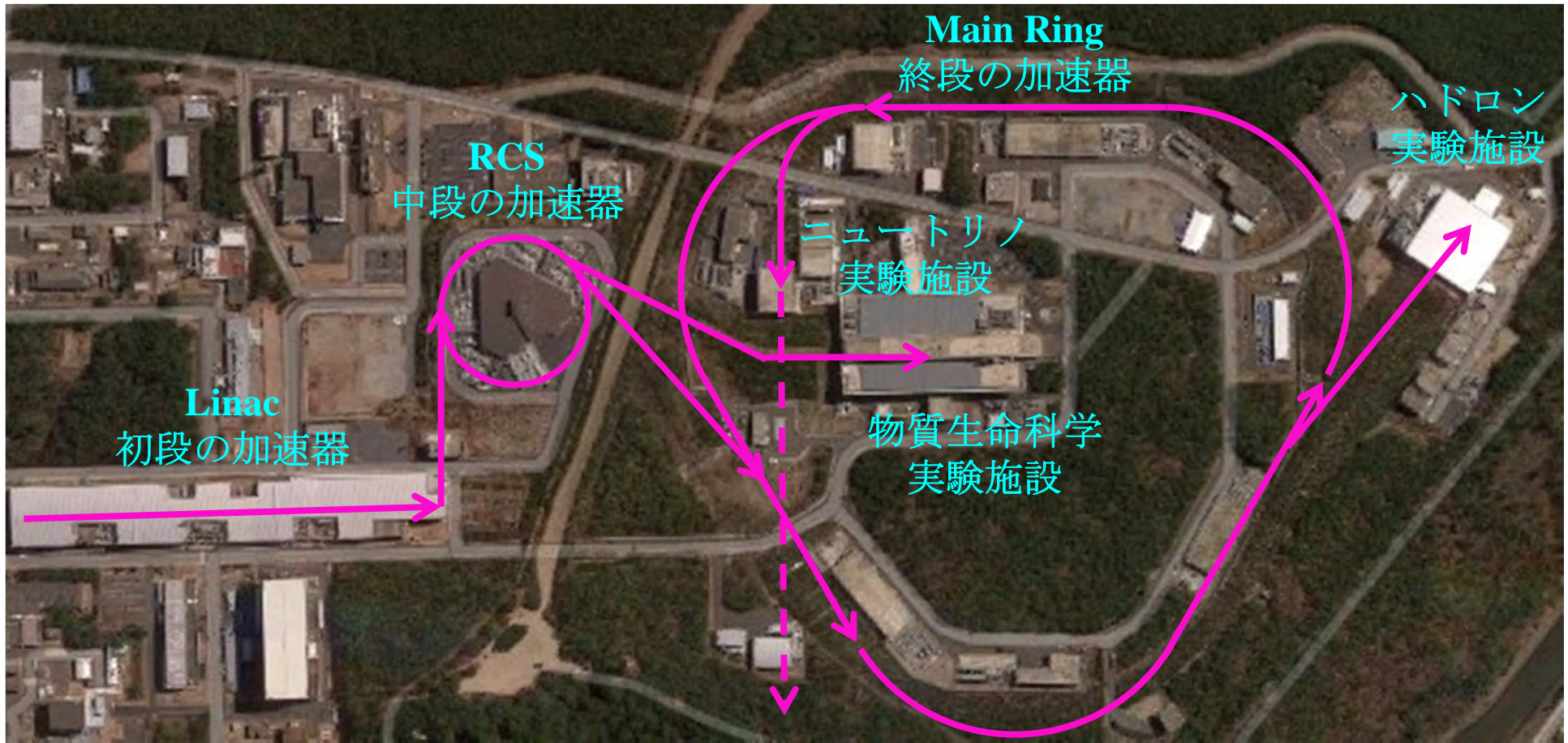
500m

加速器の例（シンクロトロン、J-PARC）



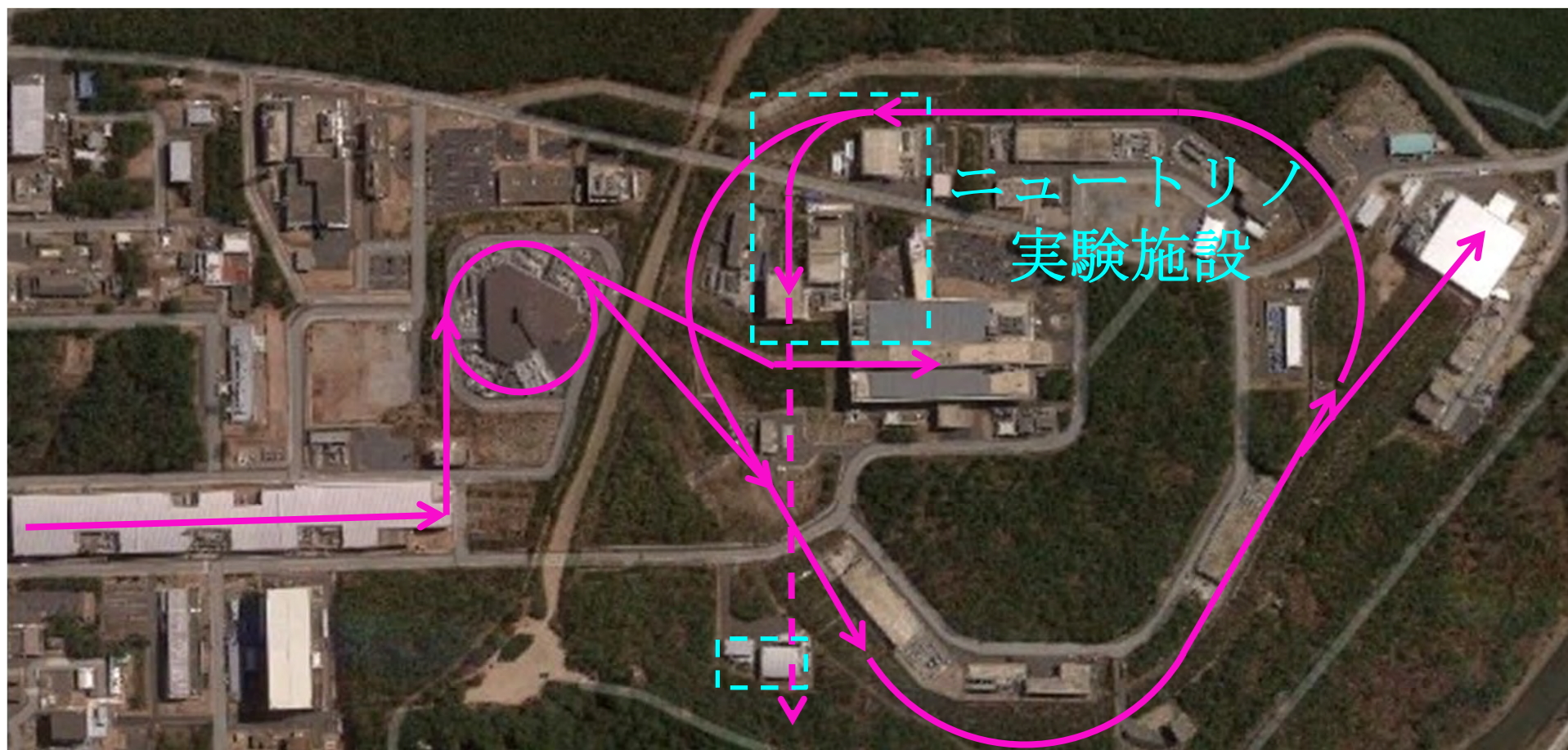
J-PARC

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

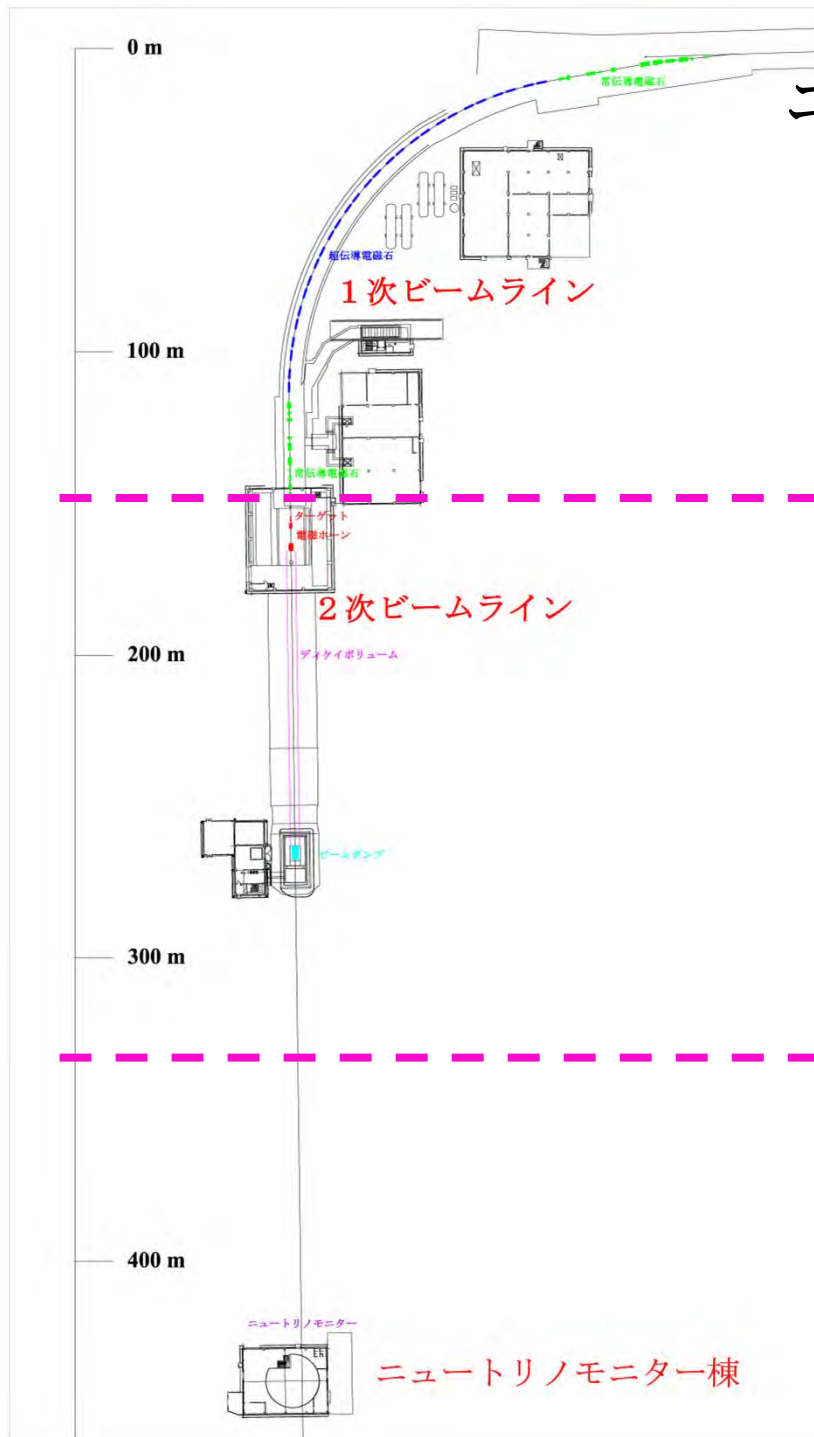
ニュートリノを生成する

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



アーク部

超伝導電磁石

1次ビームライン

常伝導電磁石

ファイナル
フォーカス部

常伝導電磁石

プリパレーション部

常伝導電磁石



11台

12台



超伝導電磁石システム

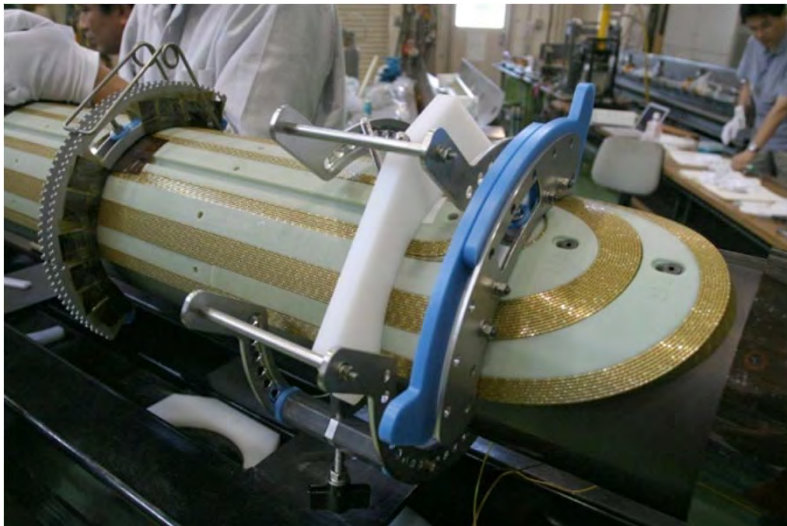
設置された超伝導電磁石



冷凍機（地上）



内部のコイル (NbTi)



Combined Function Magnet

電流 : 4400 A @ 30 GeV

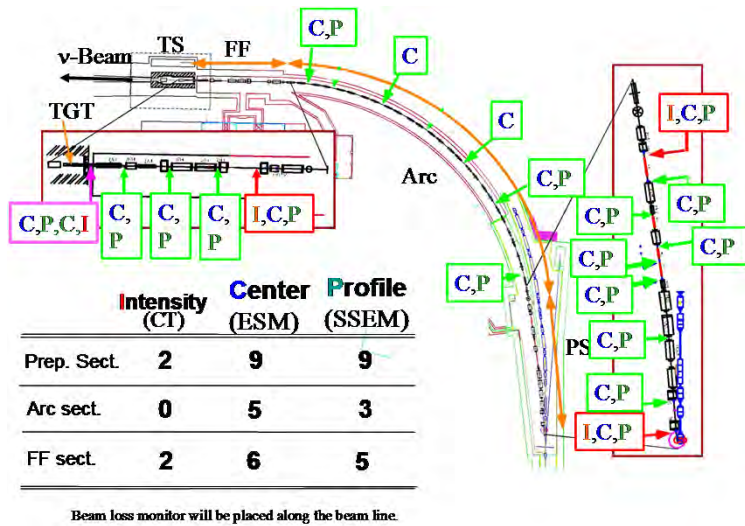
7435 A @ 50 GeV

Dipole磁場 : 2.6 T

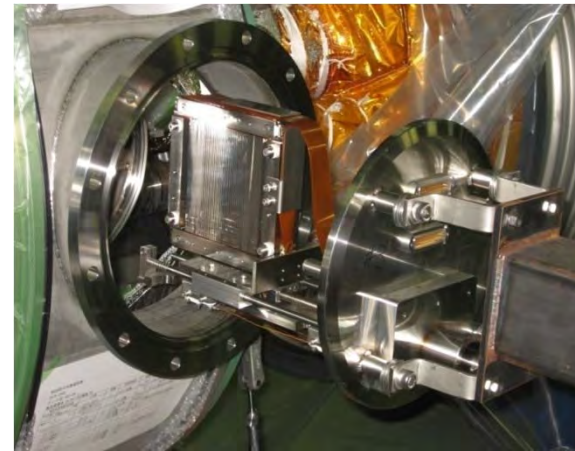
Quadrupole磁場 : 1.86 T / m

陽子ビームモニター

ビームの状態を監視する

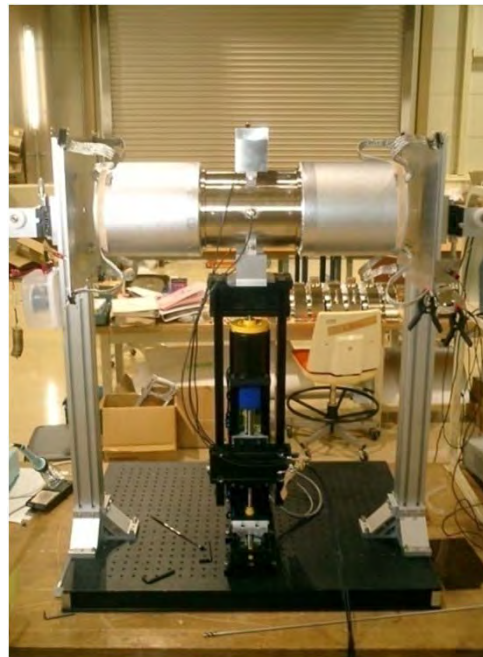


ビームの形を見る : SSEM

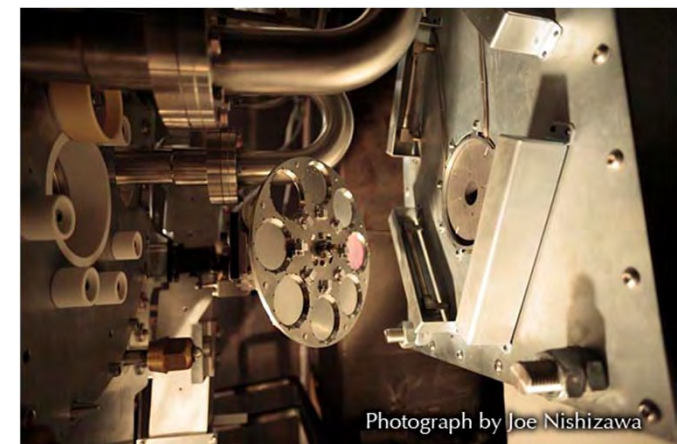


ビームの強さを見る : CT

ビームの位置を見る : ESM



ビームの位置を見る : OTR



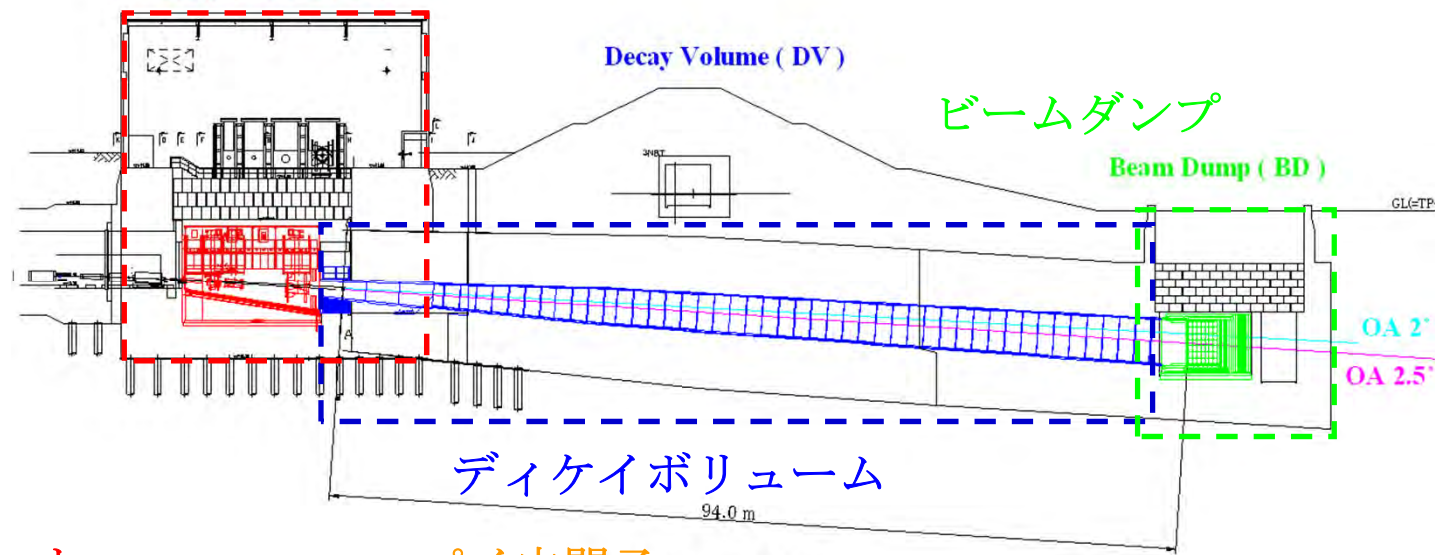
2次ビームライン

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)

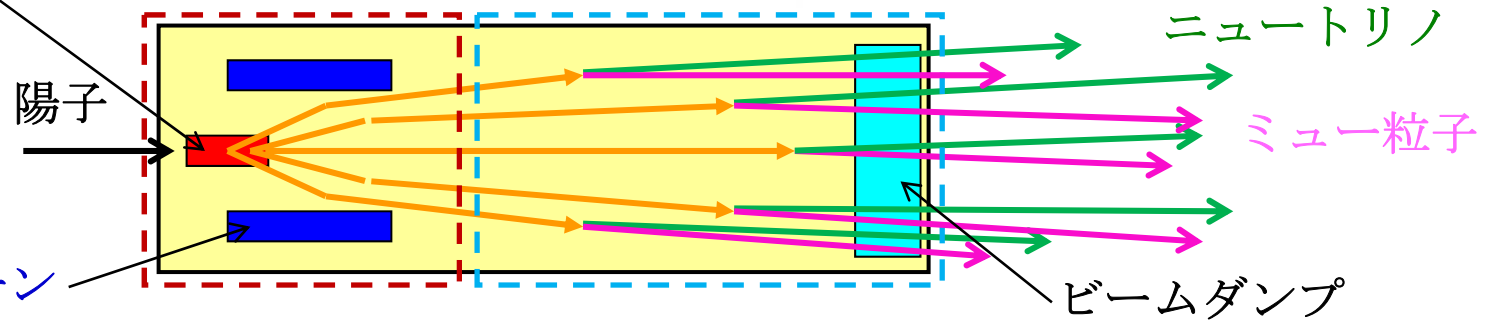


ターゲット

パイ中間子

陽子

電磁ホーン



ターゲットステーション

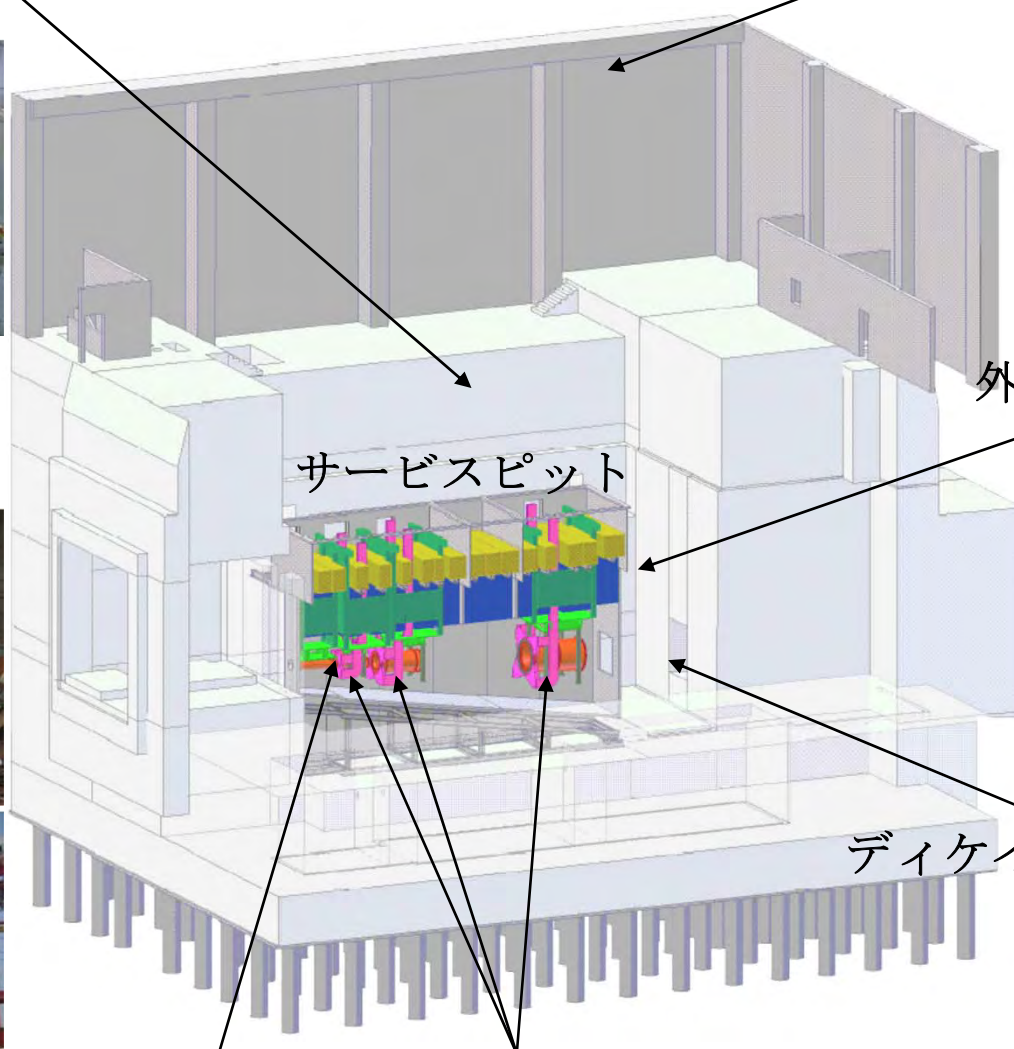
ニュートリノビームラインの心臓部

天井クレーン
(遠隔操作式)

上部コンクリート
遮蔽体 (3,400t)



ヘリウム容器
(構造体)



外部鉄遮蔽体 (2,400t)



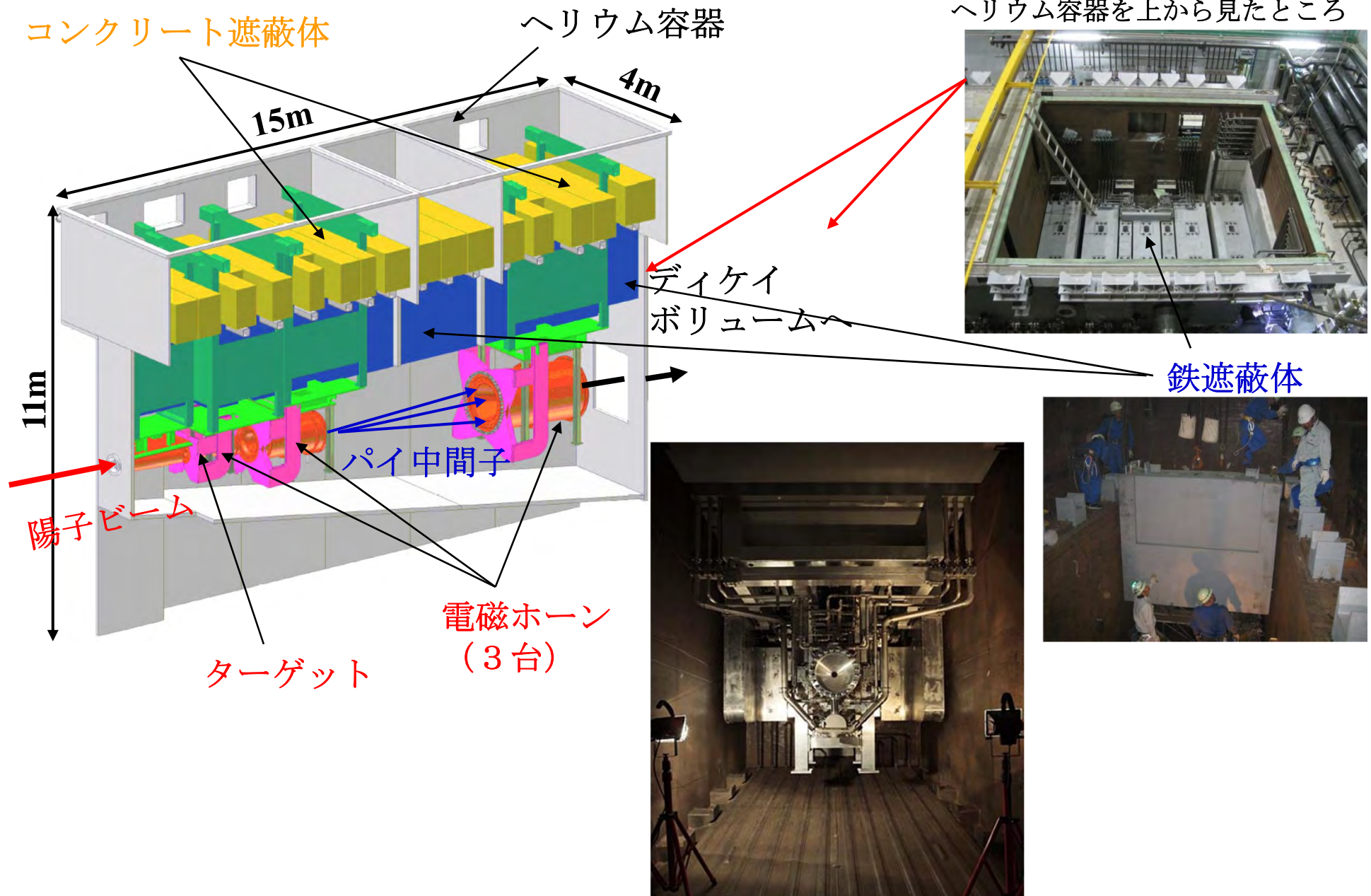
ディケイボリューム最上流部

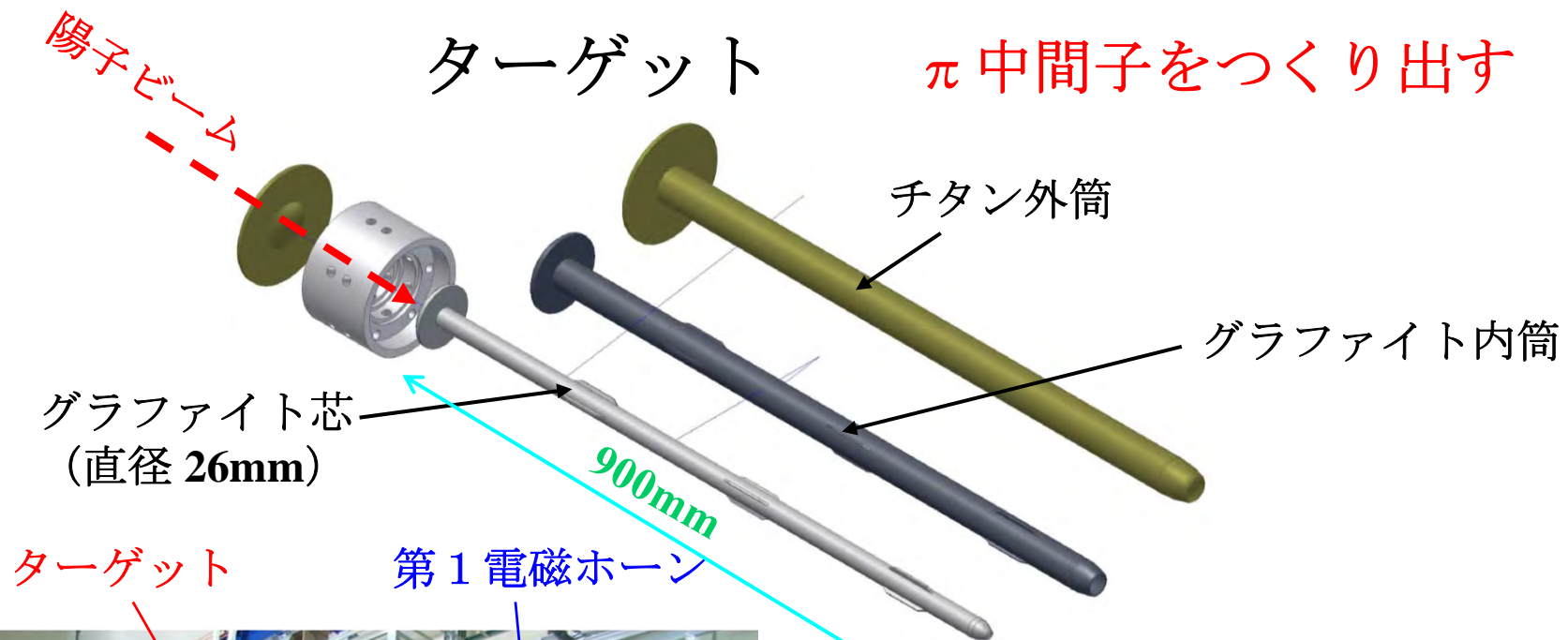


ターゲット

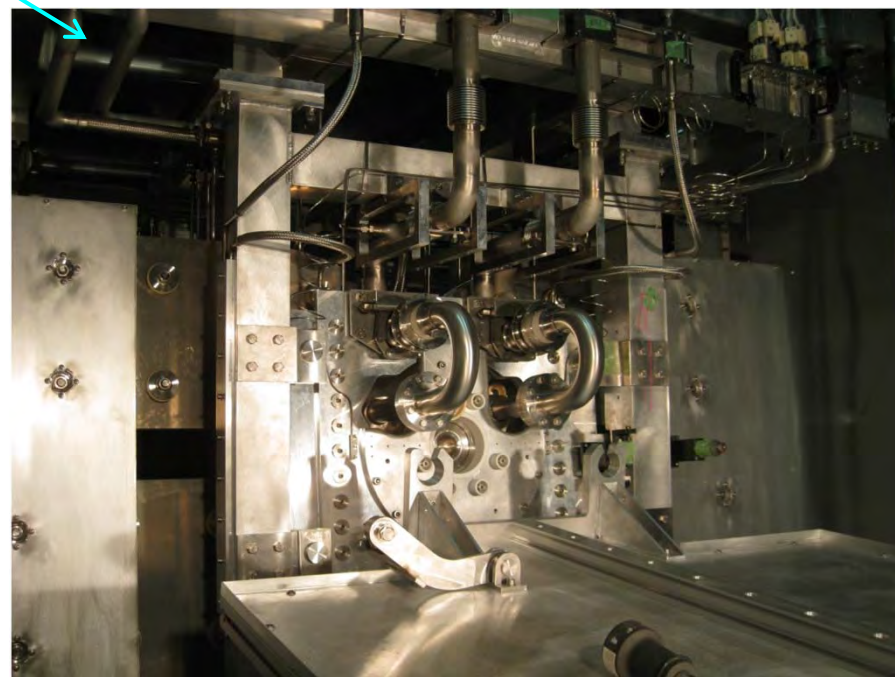
電磁ホーン

ターゲットステーション (ヘリウム容器の内側)



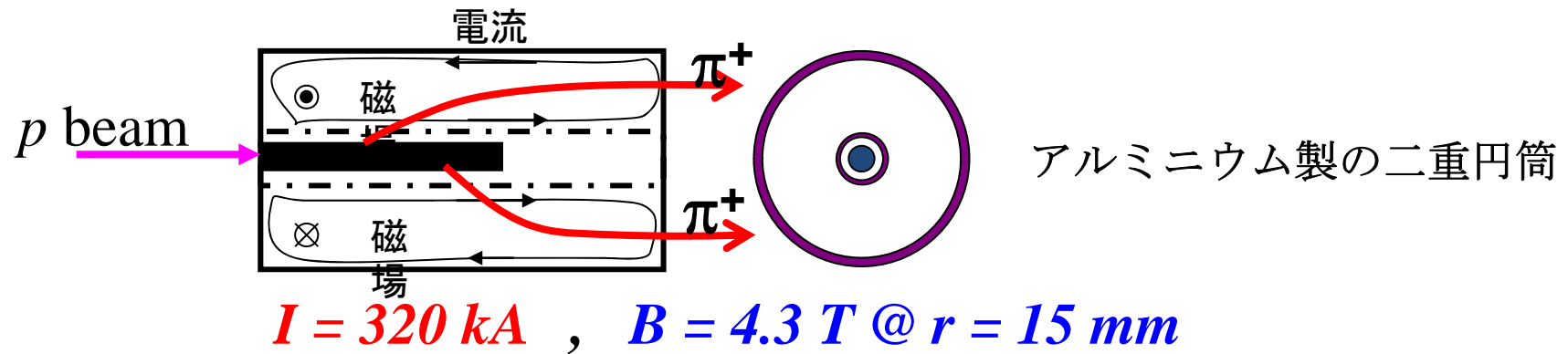


第1 電磁ホーンに挿入・固定する



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



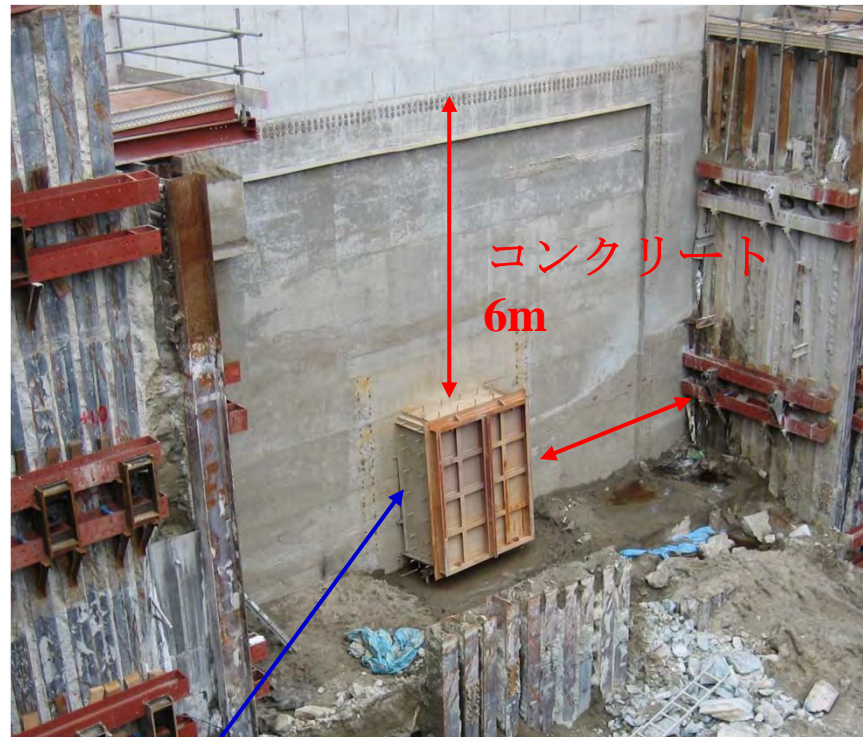
第3電磁ホーン



ディケイボリウム

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

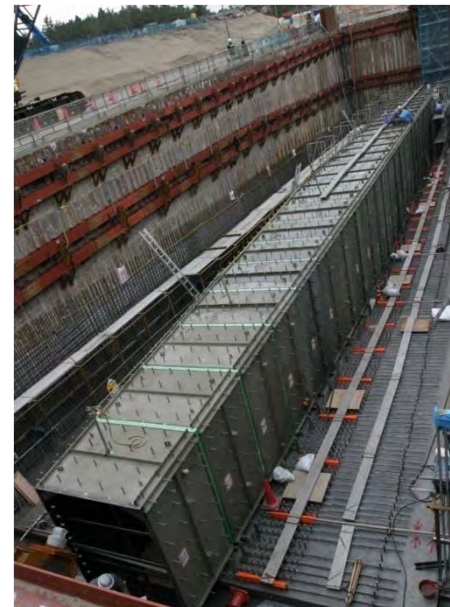
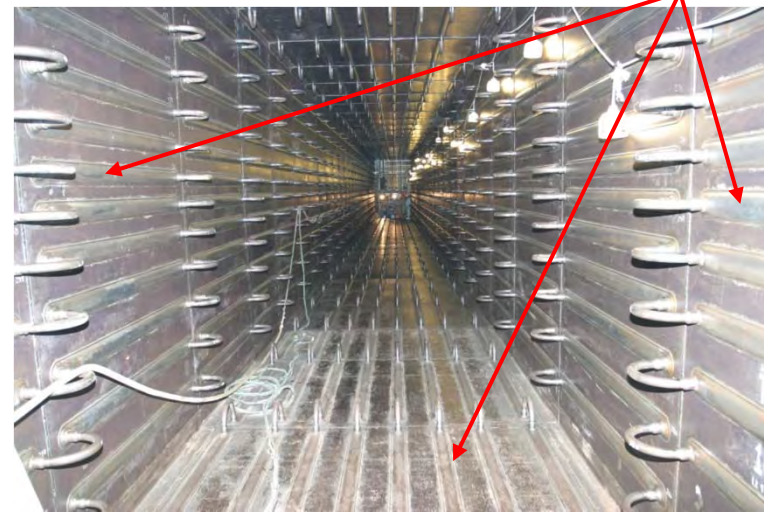


16mm
鉄板の箱

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

水冷管



鉄板外観

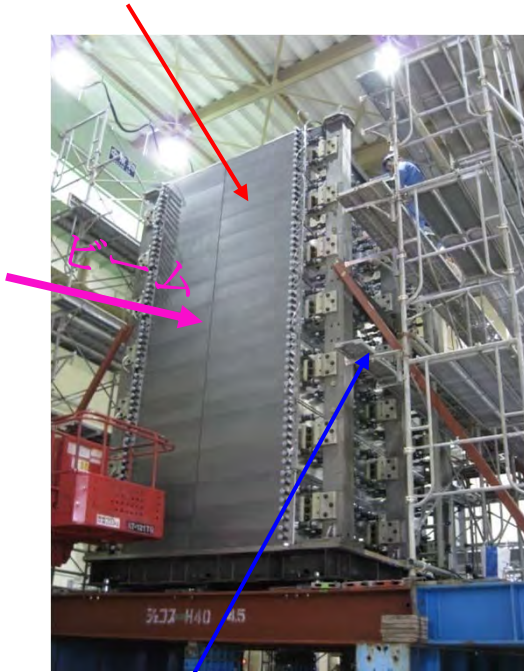
ビームダンプ

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
グラフィット

モジュール

設置状態 (DV終端部)



アルミ冷却板

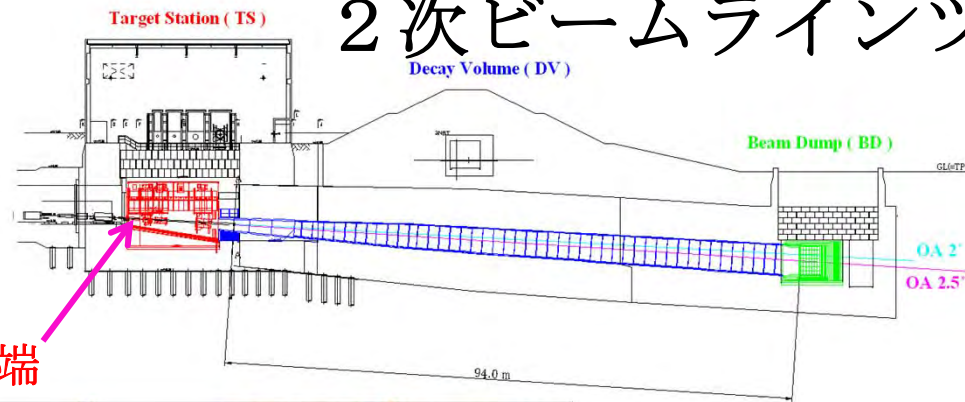


設置の様子 (2008.10.18)

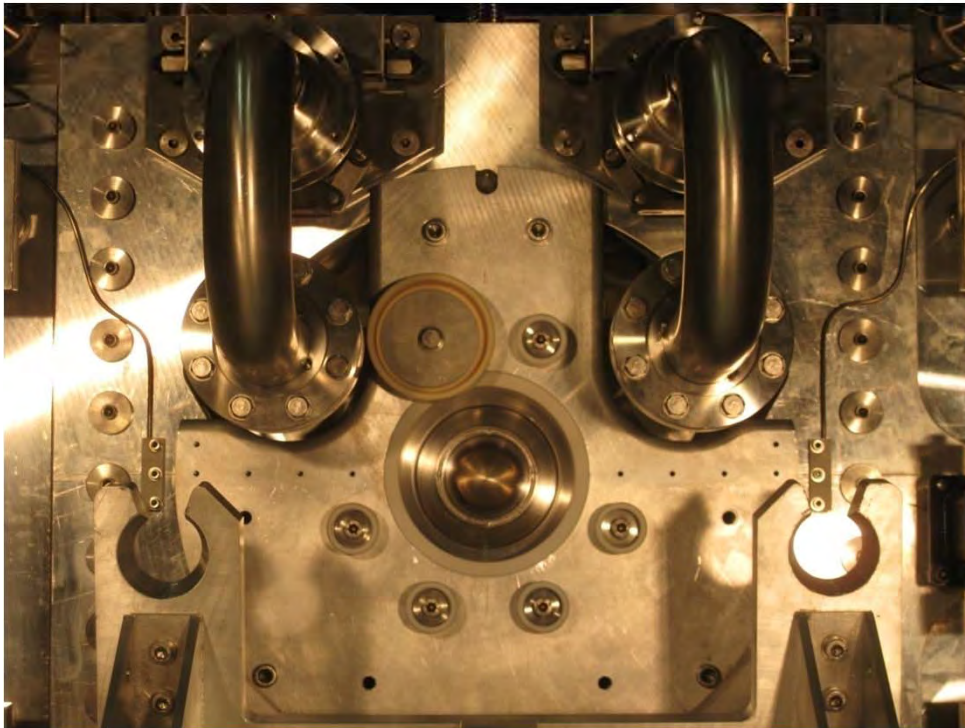


Photograph by Joe Nishizawa

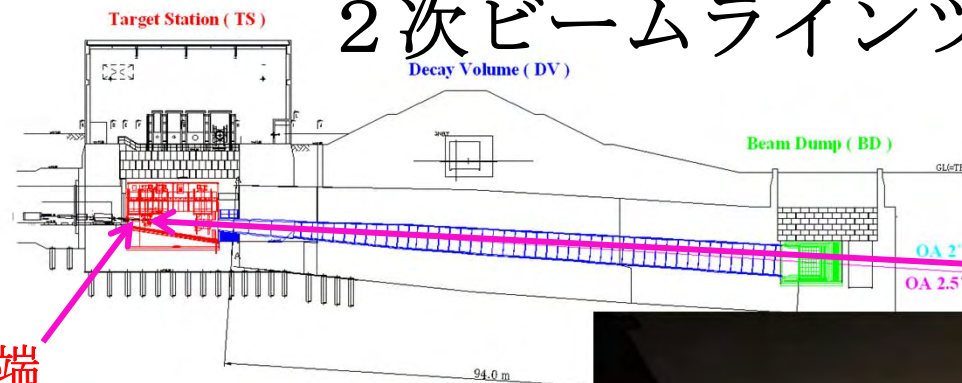
2次ビームラインツアー



ターゲット上流端

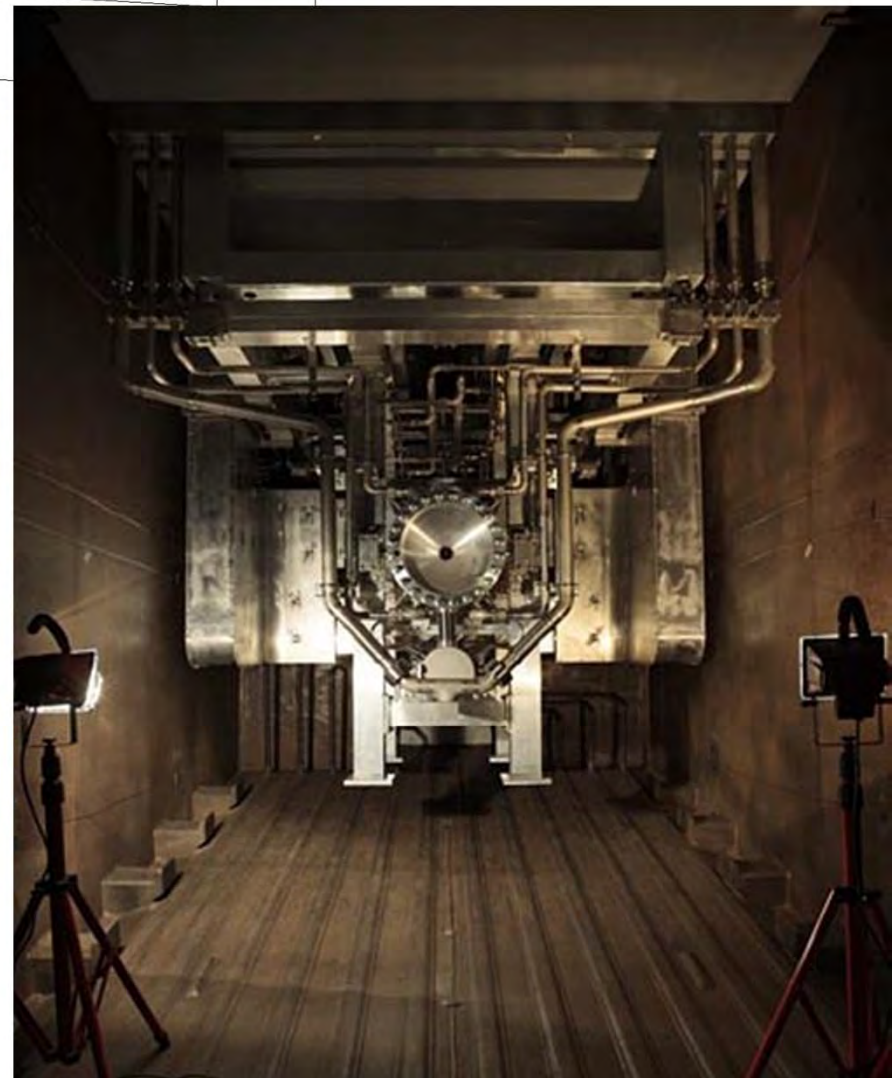
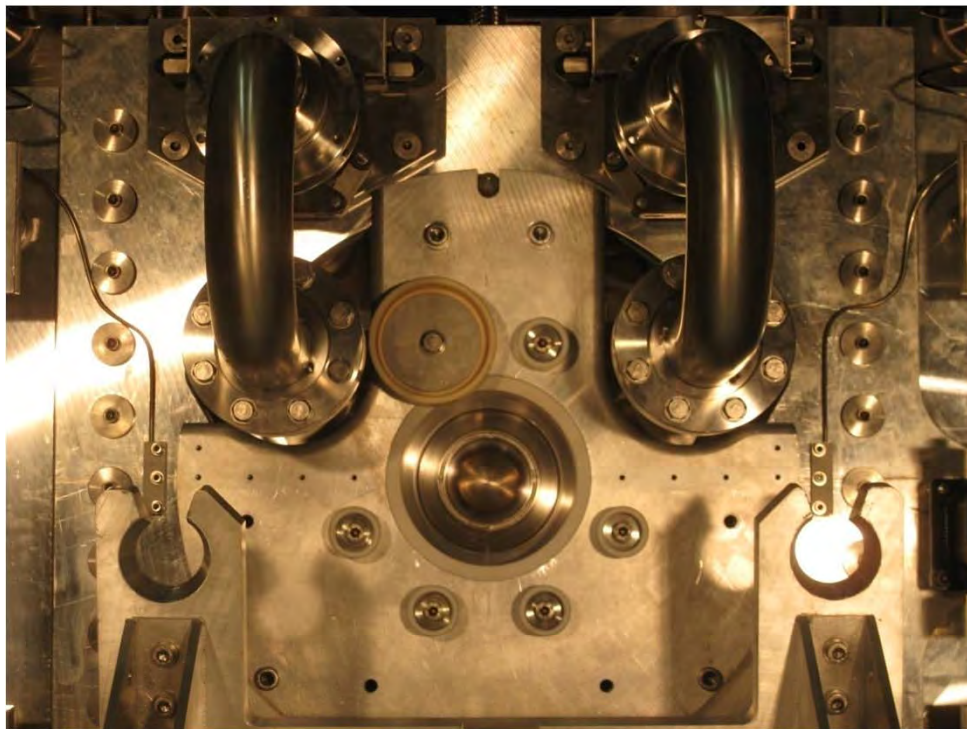


2次ビームラインツアー



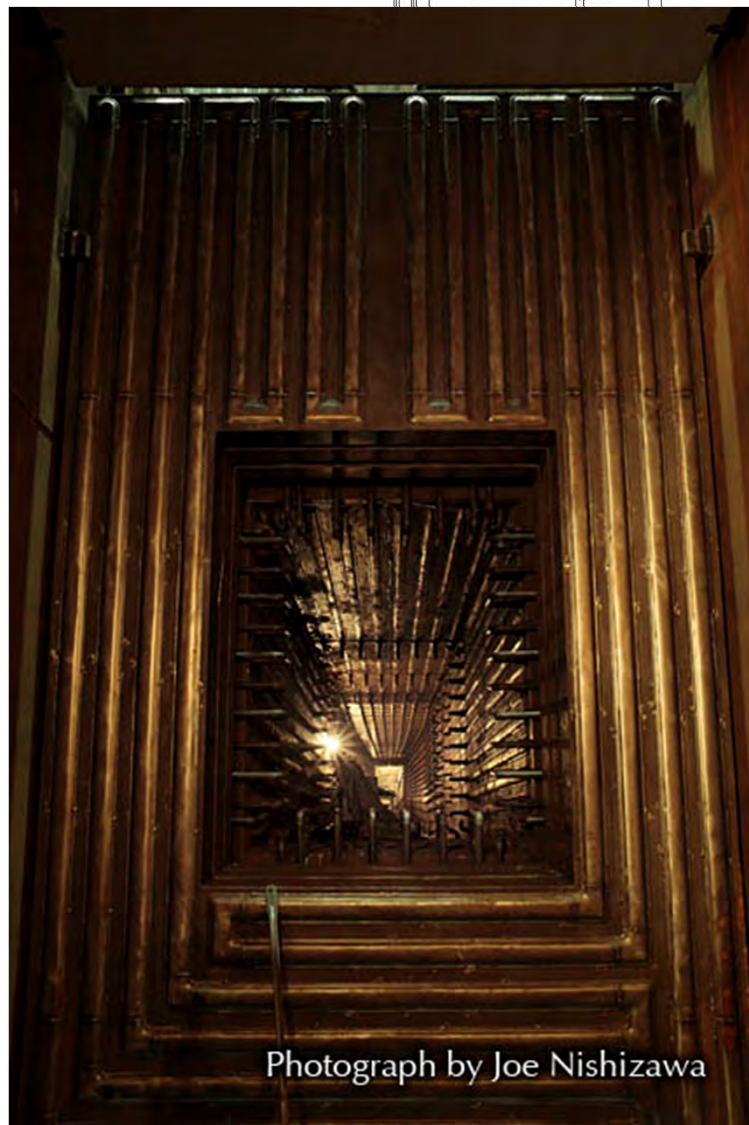
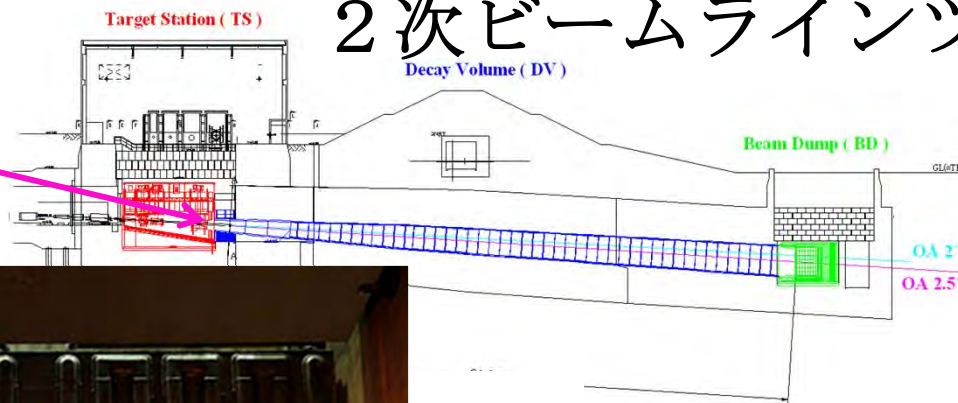
ターゲット上流端

第1電磁ホーン



2次ビームラインツアー

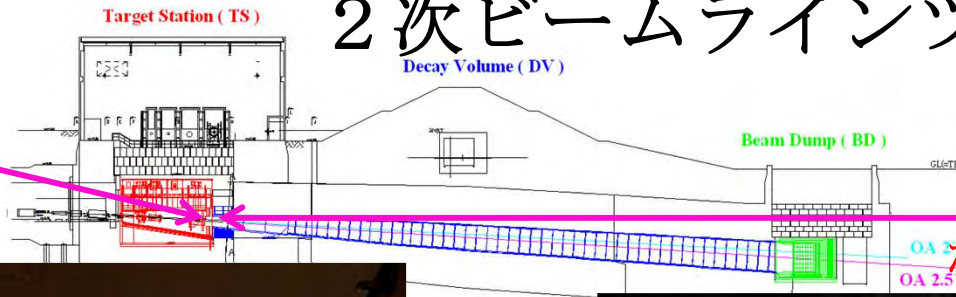
ディケイ
ボリウム入口



Photograph by Joe Nishizawa

2次ビームラインツアー

ディケイ
ボリューム入口

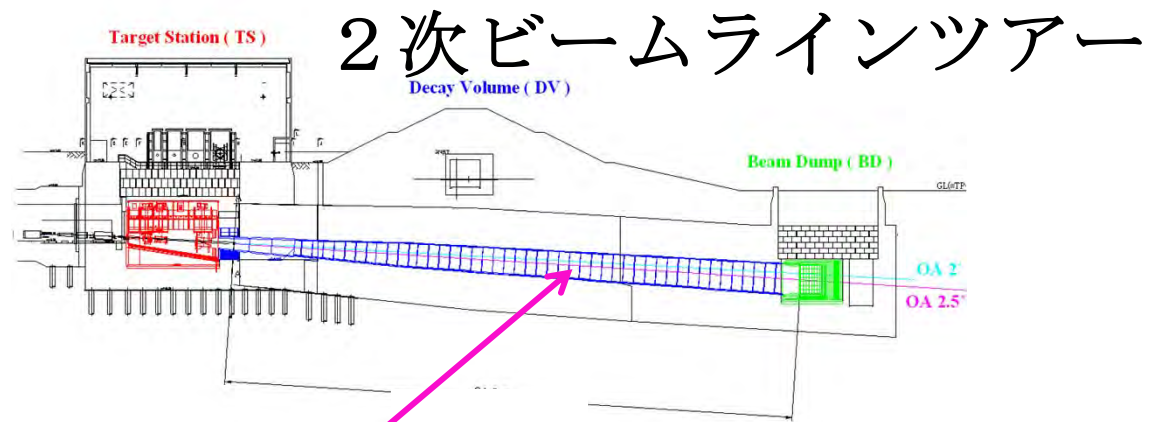


ディケイボリューム側
から見た第3電磁ホーン



Photograph by Joe Nishizawa

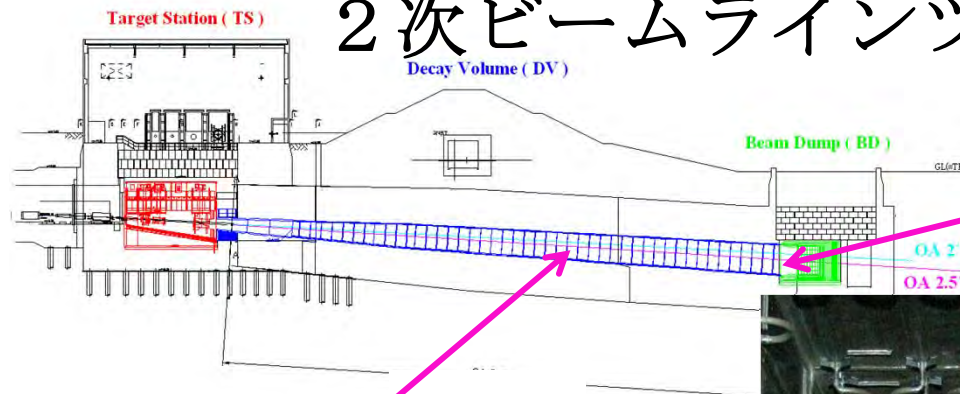




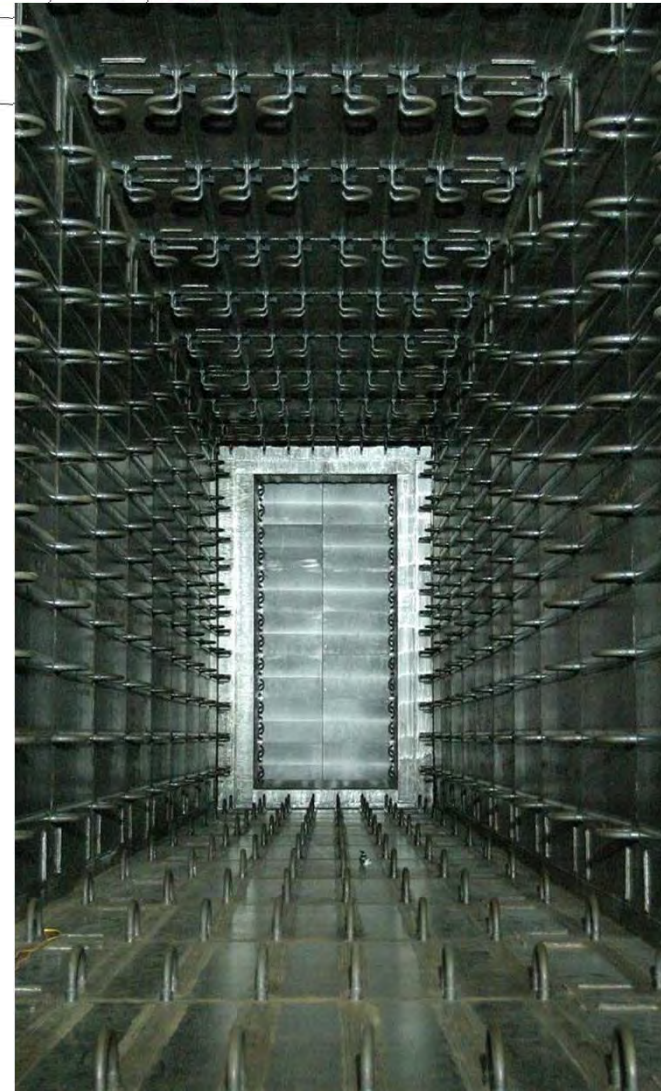
ディケイボリューム、下流から



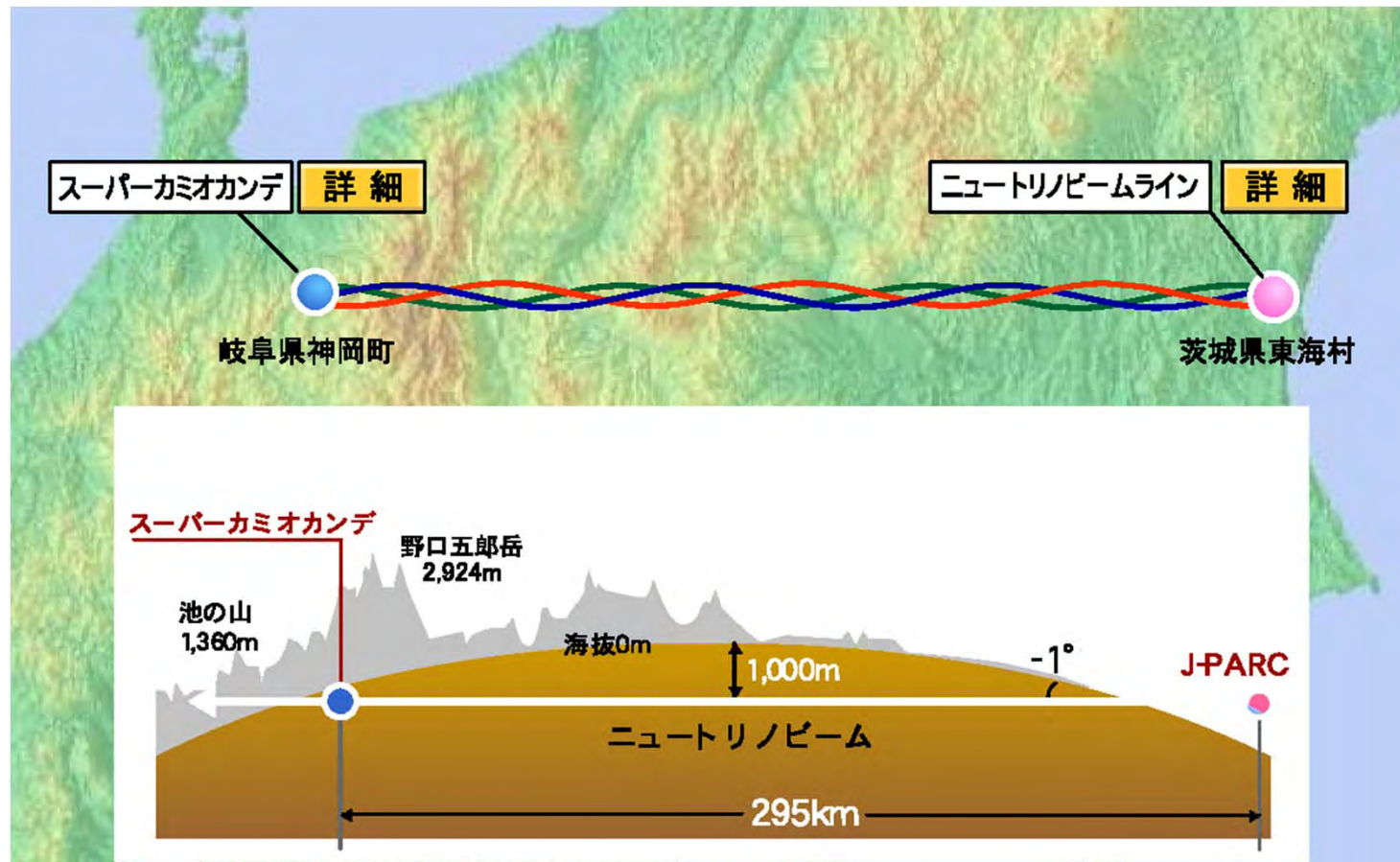
2次ビームラインツアー



ディケイボリウム、下流から

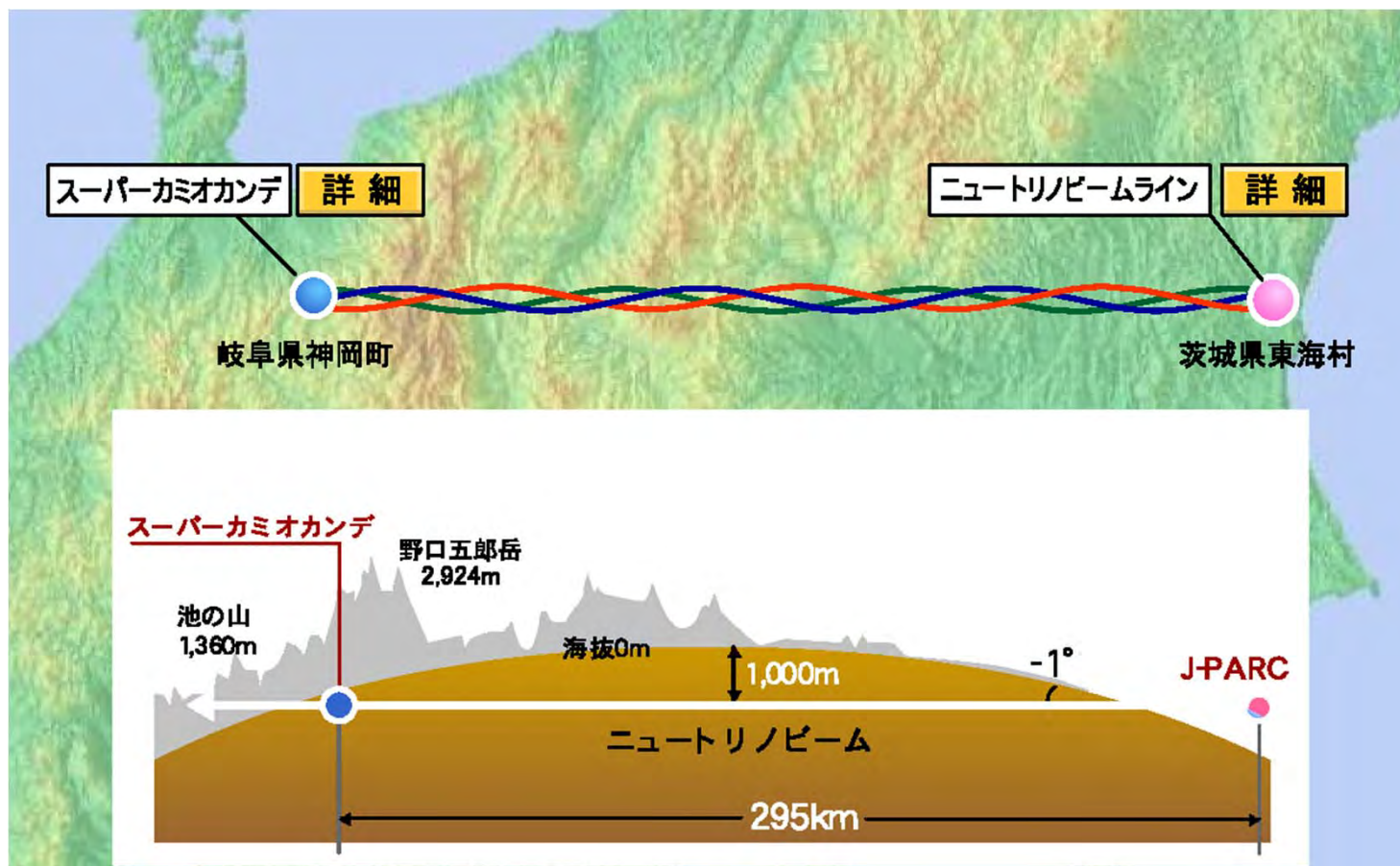


何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか？



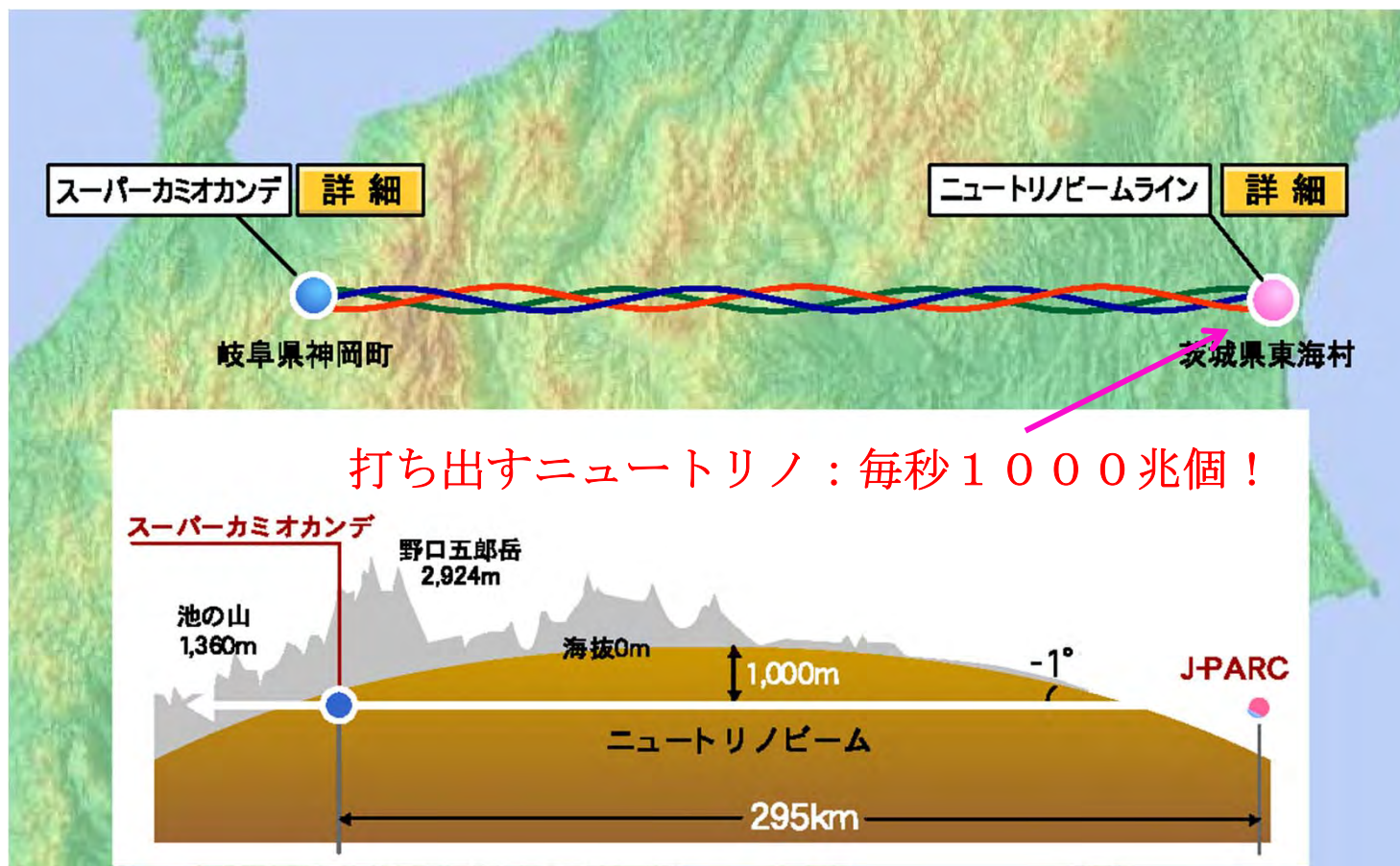
何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか??

↓
下手な鉄砲数撃ちゃ当たる！



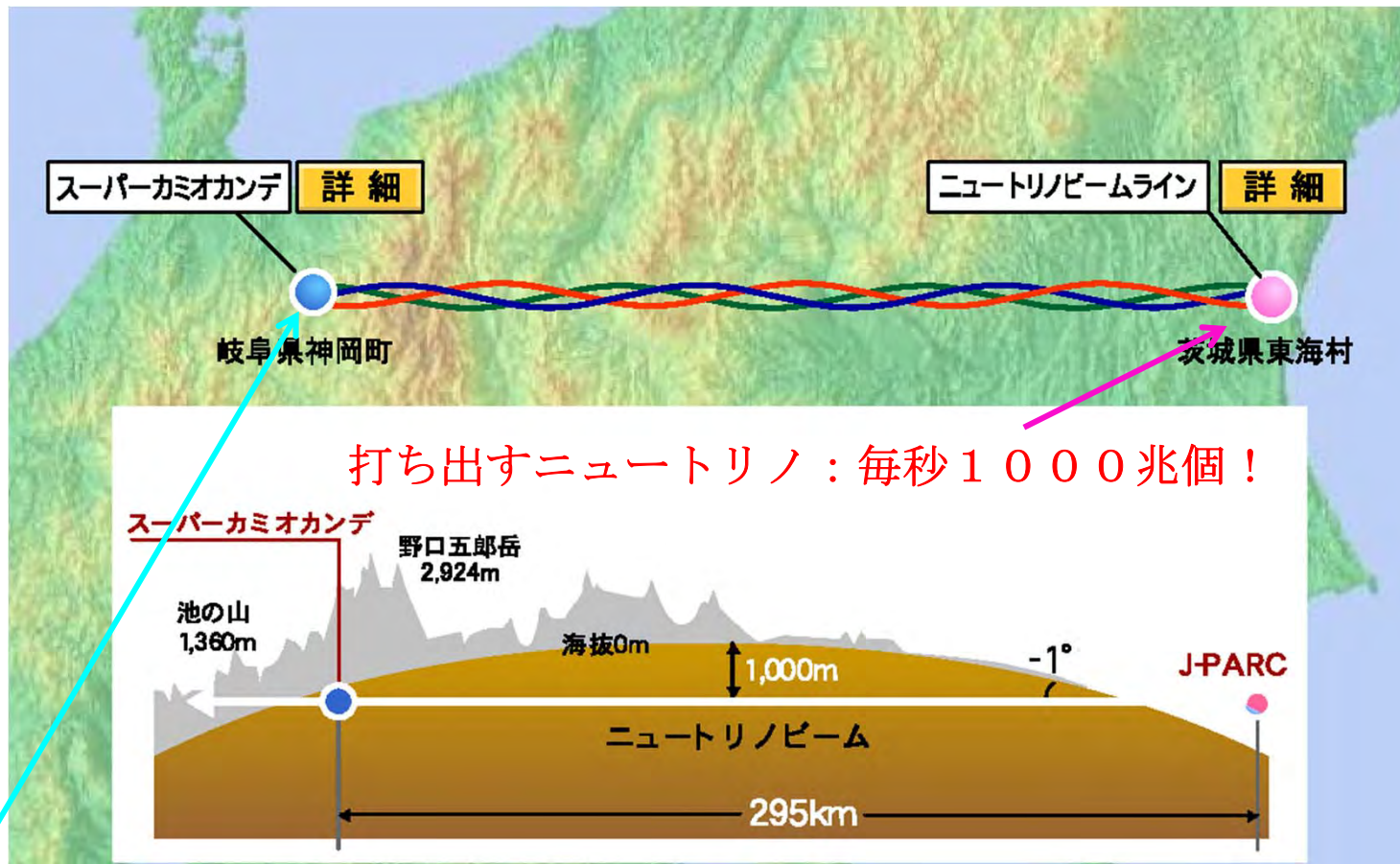
何故、地球をもすり抜けるニュートリノを、神岡では検出出来るのか??

↓
下手な鉄砲数撃ちゃ当たる！



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??

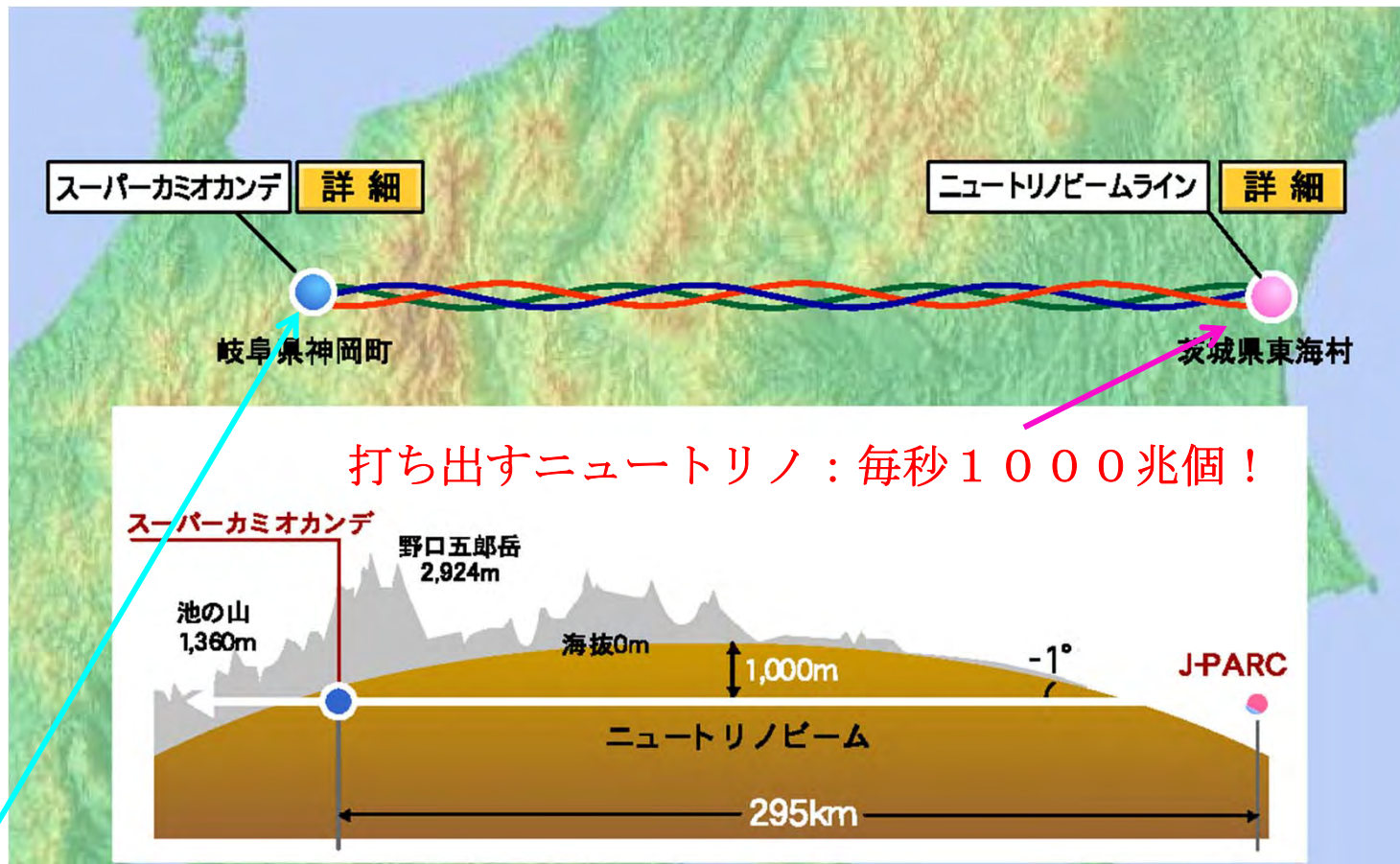
↓
下手な鉄砲数撃ちゃ当たる！



カミオカンデに当たるニュートリノ：30,000,000個/sec

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??

↓
下手な鉄砲数撃ちゃ当たる！



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

ビーム試験

実験

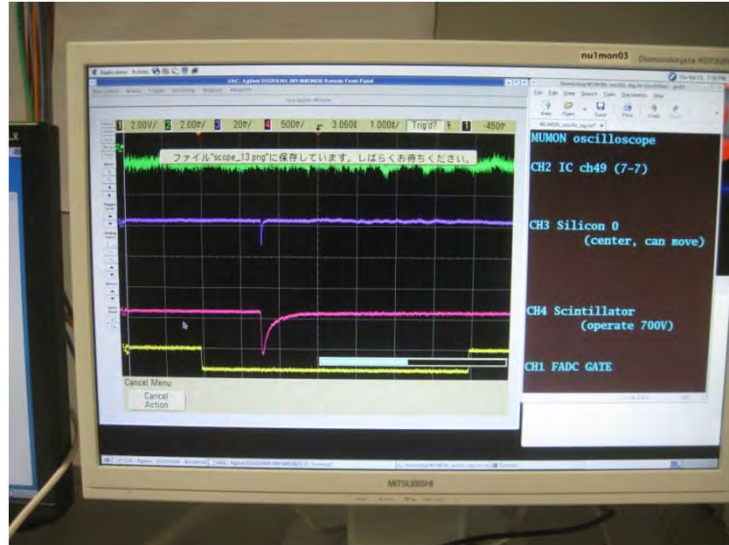
再開

	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!

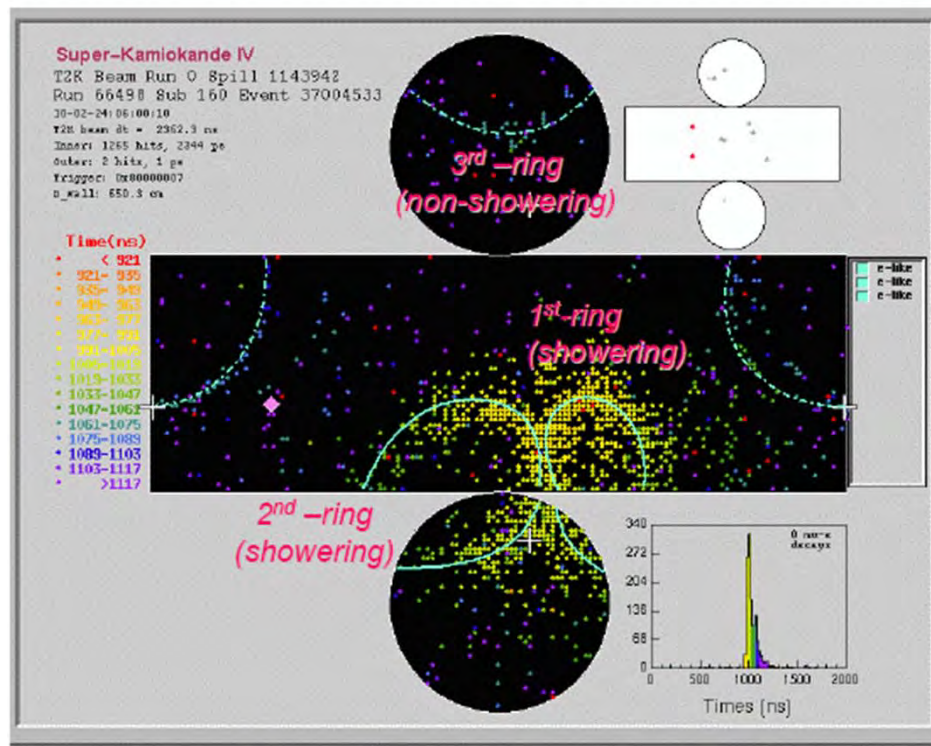
2009年4月23日、ニュートリノビーム生成に成功！

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！

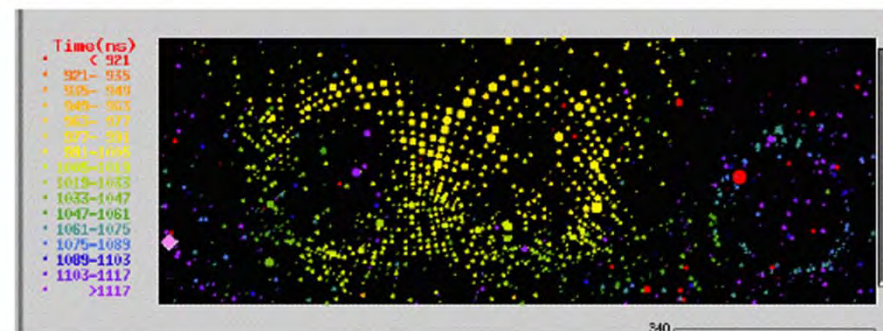
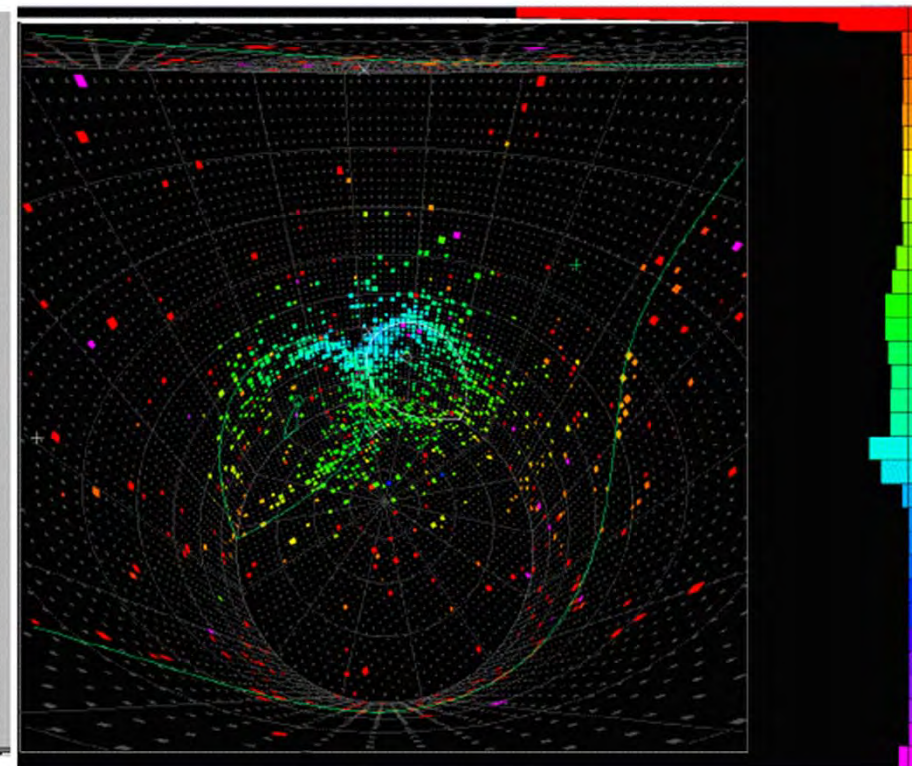
初めてのニュートリノビームの信号@神岡



1st ring + 2nd ring

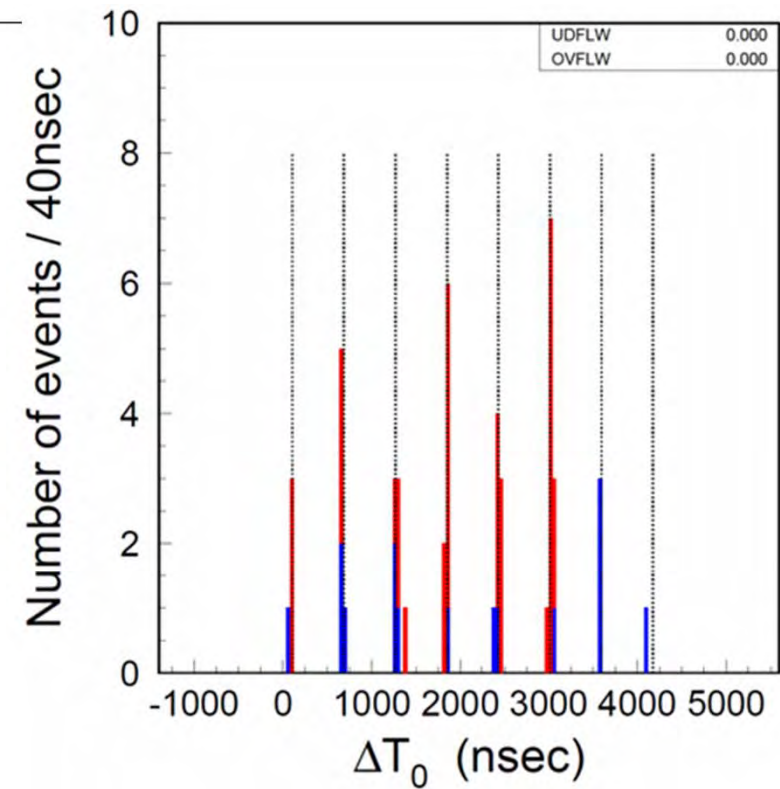
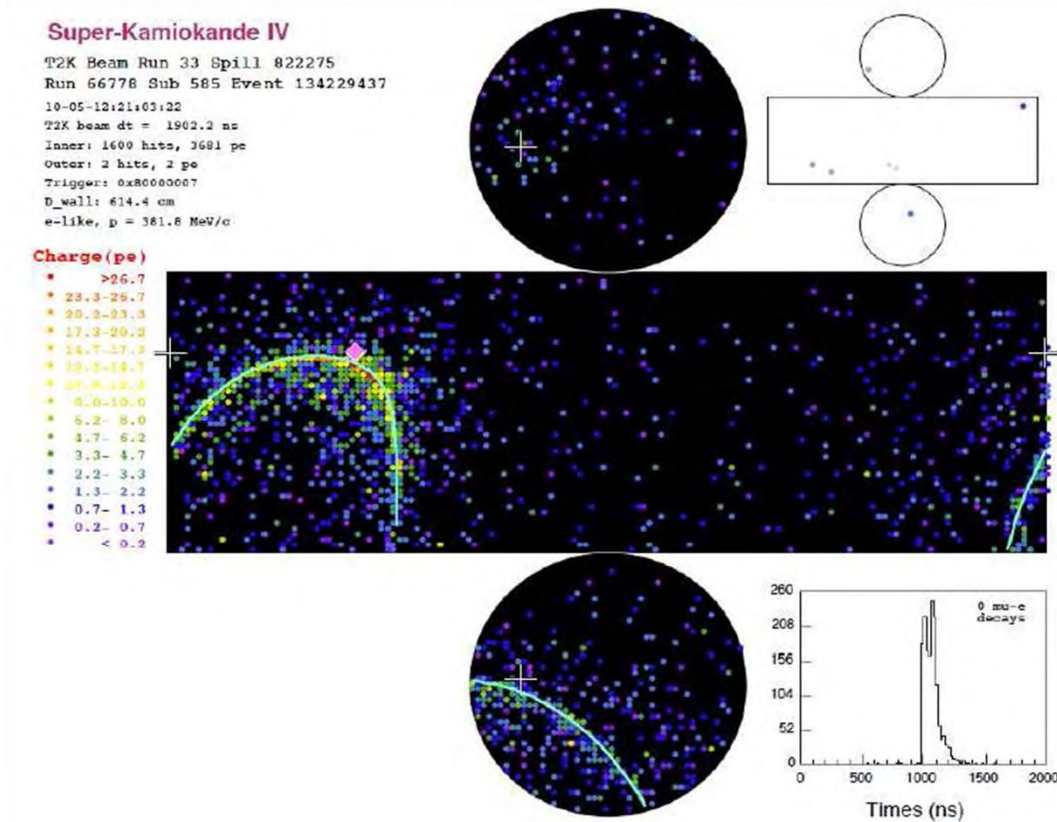
Invariant mass : $133.8 \text{ MeV}/c^2$
(close to π^0 mass)

momentum : $148.3 \text{ MeV}/c$

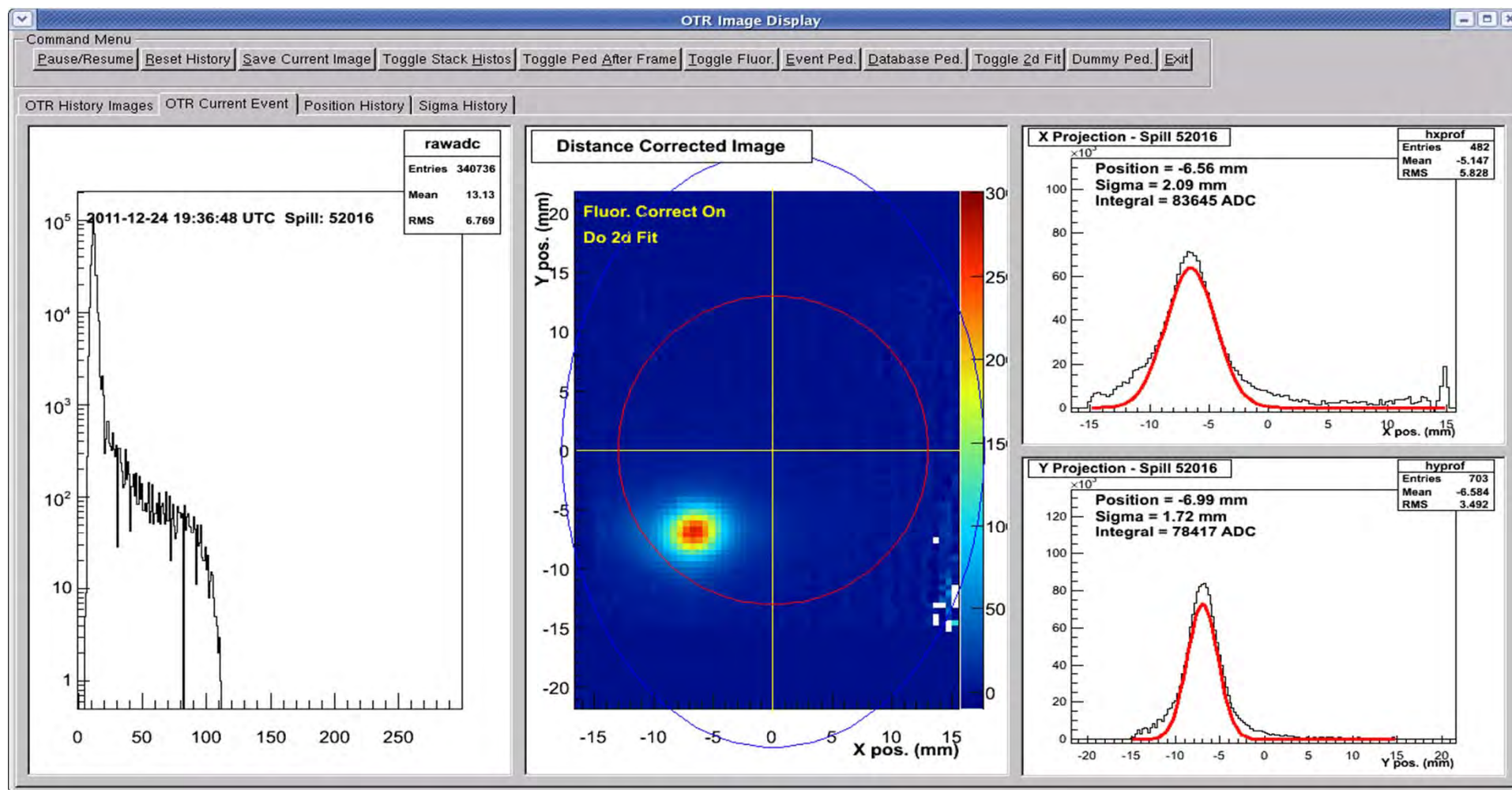


2010年5月10日、世界初の、 ミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化を観測！

初めての電子ニュートリノの信号@神岡

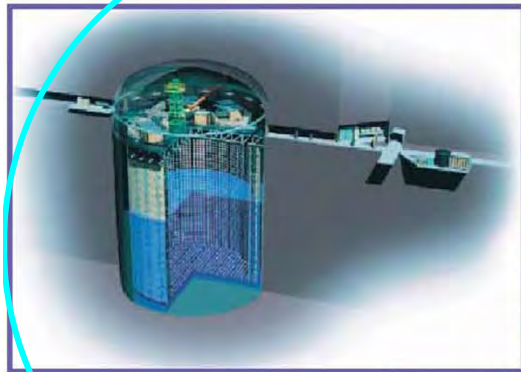


2011年12月24日、震災後初のニュートリノを生成！



素粒子物理学の世界にようこそ！(°▽°)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)

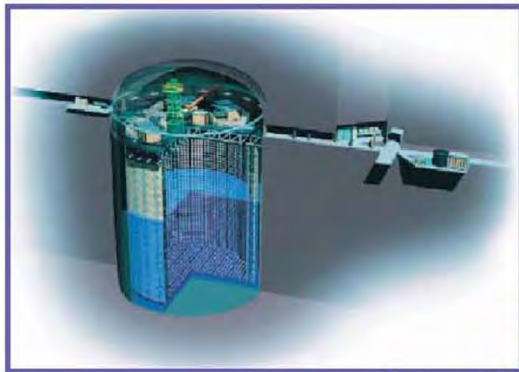


どうやって、ニュートリノを検出するのか？

この間に、何が起きているのか？

素粒子物理学の世界によろこそ！(°▽°)ノ ヨウコソ!

どうやって、ニュートリノをつくり出すのか？



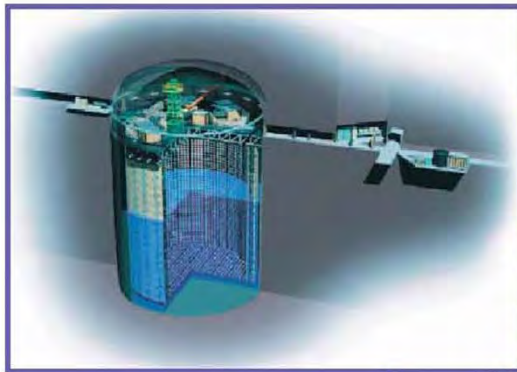
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



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!



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



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



この間に、何が起きているのか？

次回予告

J-Lunch 第6回

ニュートリノ

ニュートリノ振動