

LHC加速器の概要

近藤敬比古 (KEK)
2005.4.16 (Version-0)

参考文献:

[Ref-1] LHC Design Report Volume I : The LHC Main Ring

<http://ab-div.web.cern.ch/ab-div/Publications/LHC-DesignReport.html>

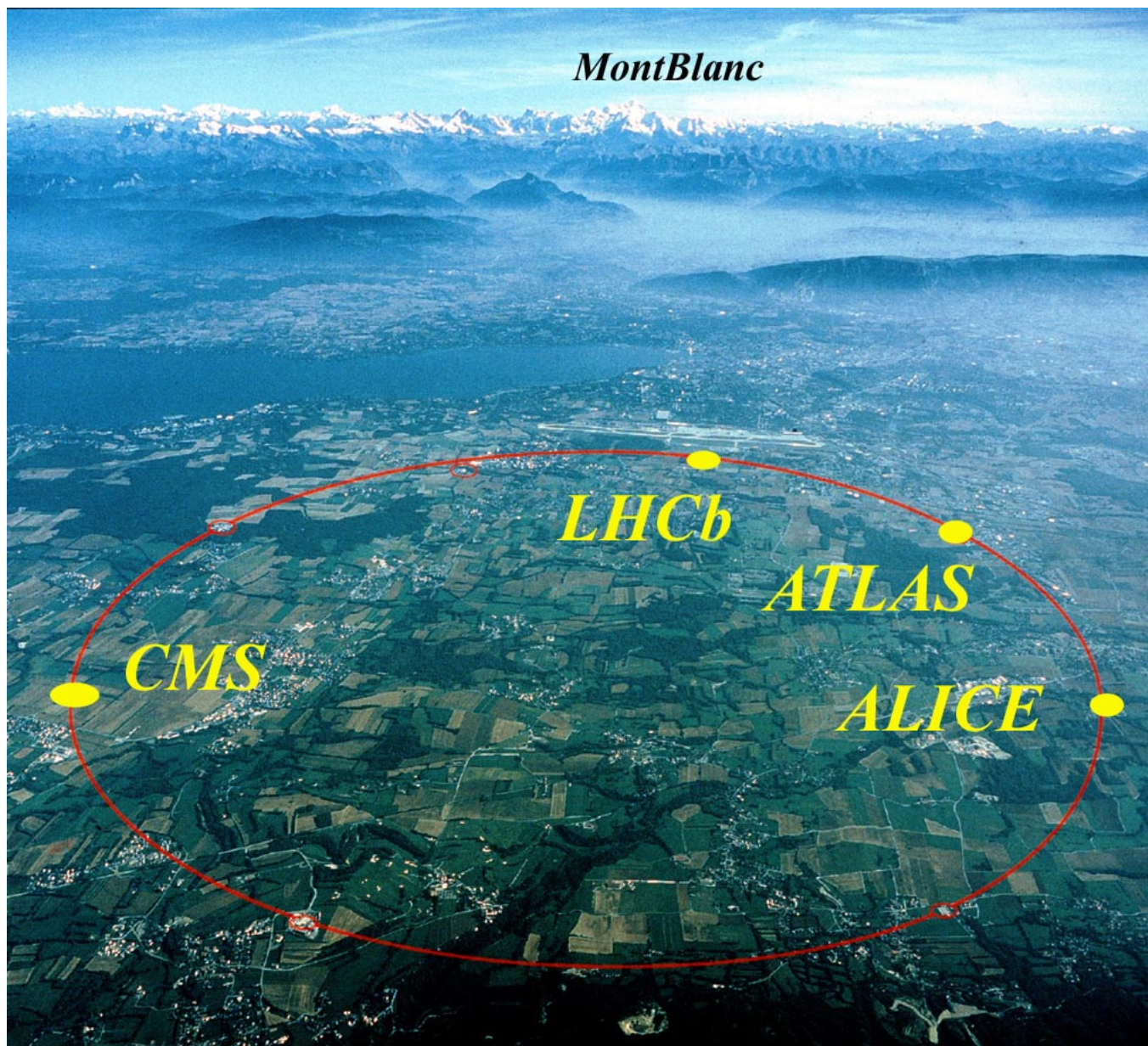
[Ref-2]

LHC計画の歴史 (1)

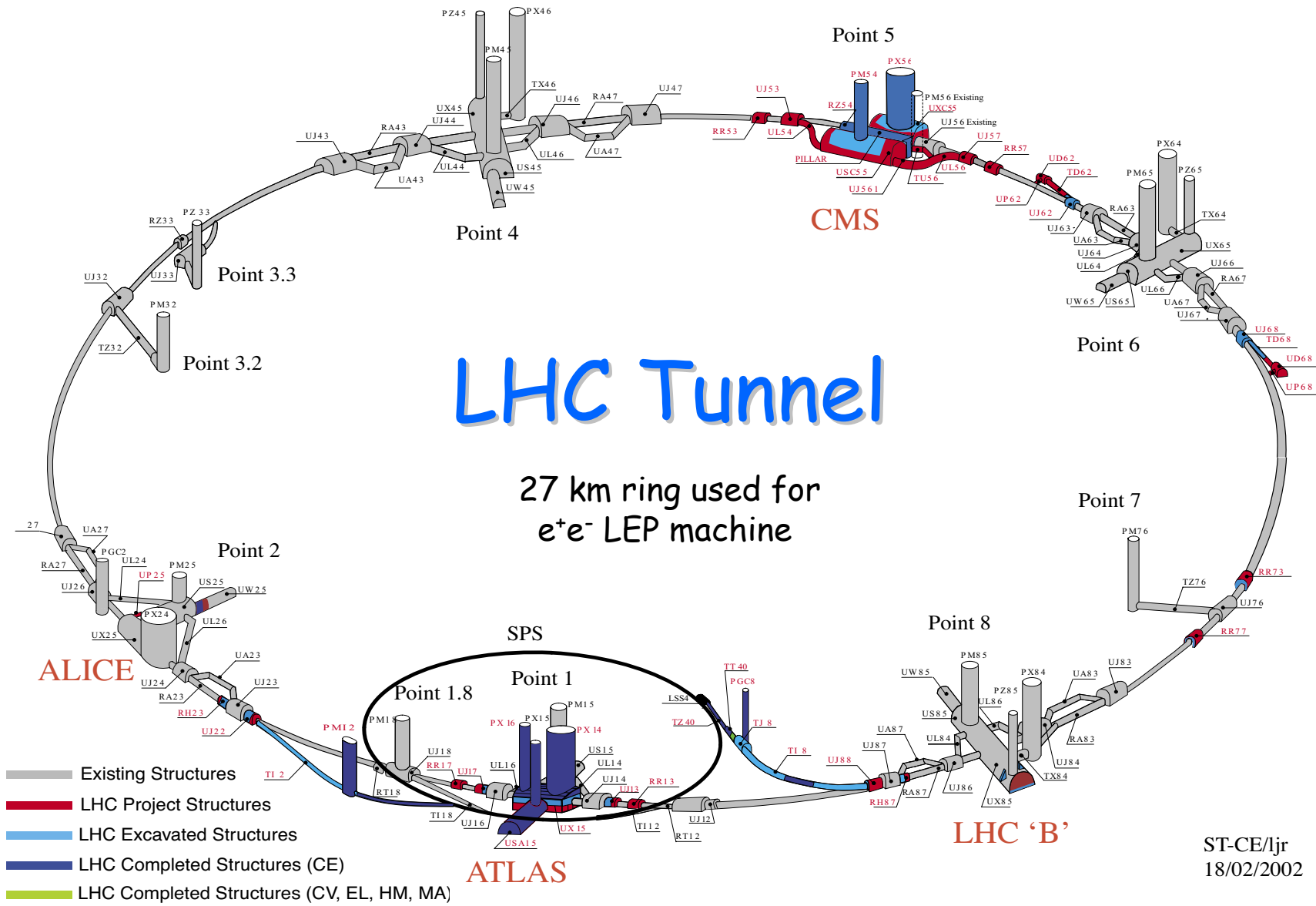
- ・ LHC計画は1994年12月に承認された。
- ・ しかし米国・日本などの非加盟国からの資金協力が未定なので、2004年までに $E_{CM} = 10\text{TeV}$, 2008年までに14TeVの2段階で建設することとされた。
- ・ 1995.5.10 日本による第1次建設協力発表(加速器に50億円)
- ・ 1996.1 ATLAS, CMS実験の承認。
- ・ 1996.3 インドの建設協力(加速器に\$12.5M)
- ・ 1996.6 ロシアの建設協力(67MCHF detector込)
- ・ 1996. カナダの建設協力(加速器にCanadian\$30M)
- ・ 1996.12 日本の第2次建設協力(加速器に38.5億円)
- ・ 1996.12 LHCを2005年に一段階で14TeVで建設する決定。

LHC計画の歴史 (2)

- ・ 1997.12 アメリカDOE+NSFによる建設協力の決定
(加速器に\$200M、測定器に\$331M)
- ・ 1998.5 日本が第3次建設協力発表(加速器に50億円)。
これで日本の加速器協力合計は138.5億円。
- ・ 2000.5 LEP-IIで114GeVヒッグス粒子の兆候が出る。
- ・ 2000.11.2 LEP加速器の11年間にわたる運転を終了。
- ・ 2001.9 LHC建設コストの増加問題。
- ・ 2001.12 External Review Committee(ERC)を設置する。
- ・ 2002.6 ERC報告。LHC加速器の完成を**2007年**に変更。



トンネル周長 27km (参考:東京JR山手線の周長 34.5km)



LHC Tunnel

27 km ring used for e⁺e⁻ LEP machine

Cost : 2,952 MCHF + 328 MCHF = 3,281 MCHF (~3,000 億円)
 (machine) (exp. area)

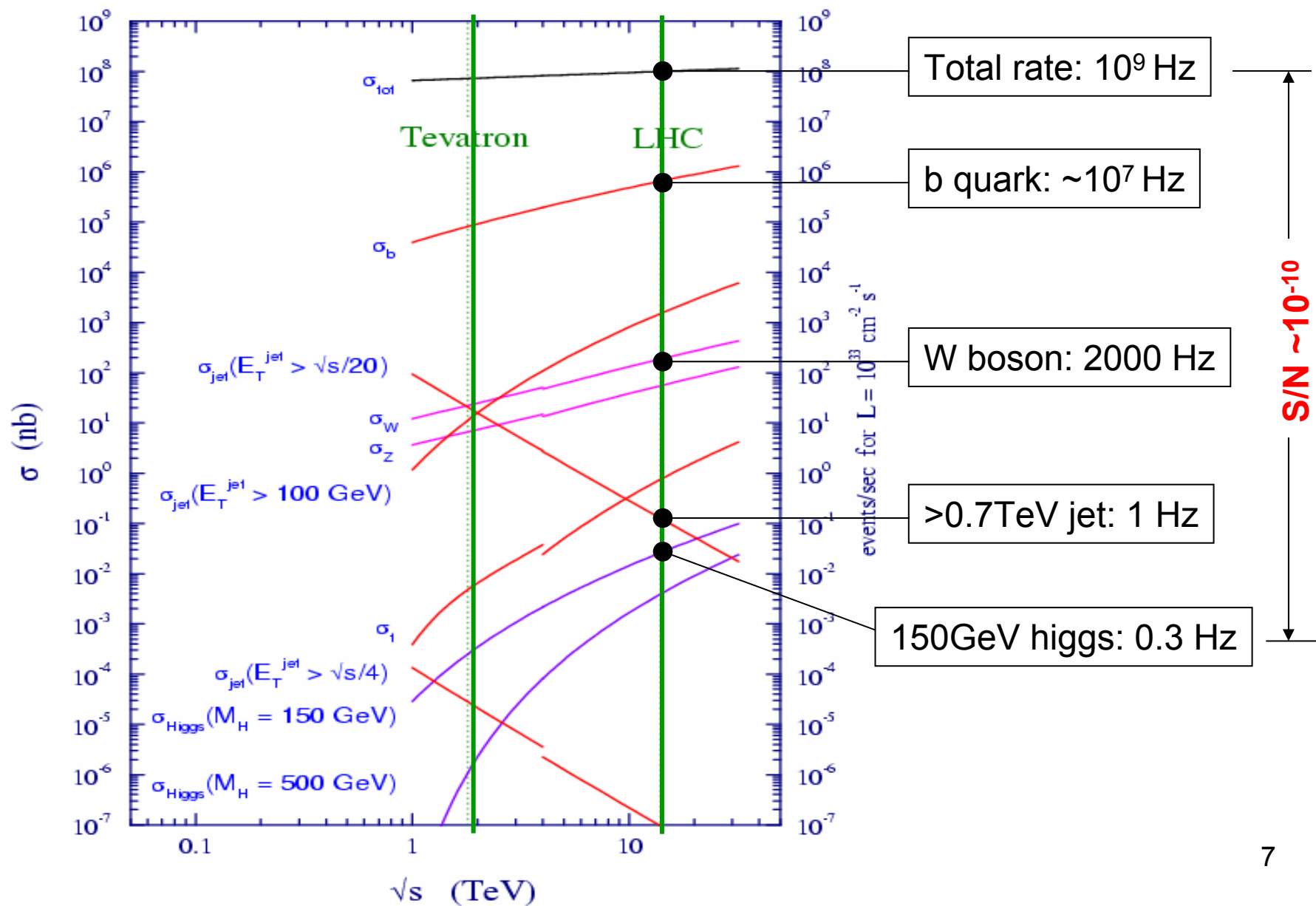
ST-CE/ljr
18/02/2002

LHC Goals

- $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ (7 X Tevatron)
→ search for new massive particles up to $m \sim 5 \text{ TeV}$
- $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (>100 X Tevatron)
→ search for rare processes with small σ ($N_{\text{event}} = L\sigma$)

pp interactionでの
いろいろな生成断面積

$L=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ でのrate



LHC machineの基本設計

- $L=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$: しかし pbar-p では $L=10^{34}$ は達成不可能。
 - ppでは2リングが必要だがLEPトンネルは狭すぎる。
 - クライオスタットの中に2マグネットを入れる (twin bore magnet)。

- **最高エネルギー**を目指すため磁場を出来るだけ高くする。



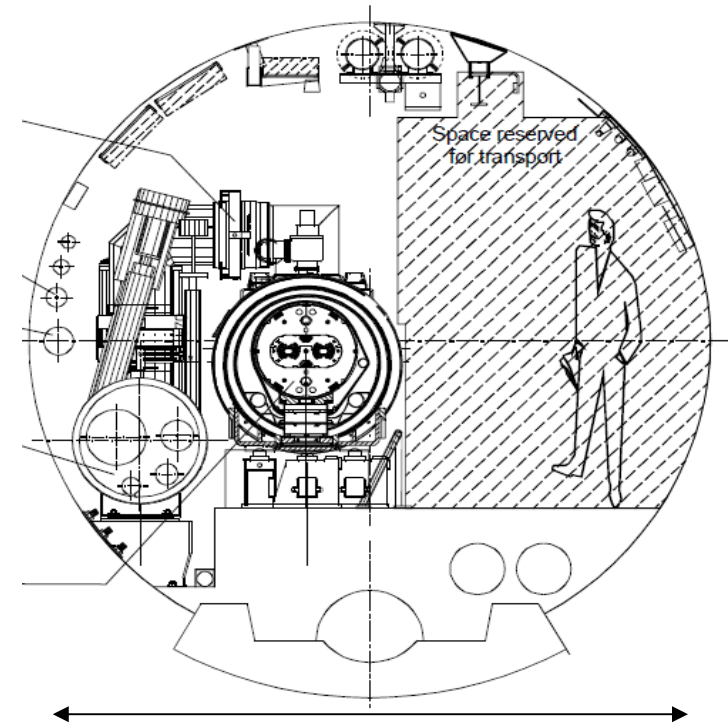
加圧超流動ヘリウム冷却で**1.9K**まで冷やし、NbTiの超伝導線材を使って $B(\text{dipole})=$ **8.33 T**を実現できた。



LEPトンネル内に出来るだけ多くのdipoleマグネットを敷き詰めることにより

$$E(\text{beam}) = 7 \text{ TeV}$$

を達成できる。



How to reach $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$?

簡単な計算方法

$$L \approx \frac{f \cdot N_B^2}{4\pi\sigma_X\sigma_Y} \approx \frac{40 \times 10^6 \cdot (10^{11})^2}{4\pi \cdot (16 \mu\text{m})^2} \approx 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

f (collision frequency)	40 MHz (=1/25ns)
N_B (number of protons per bunch)	10^{11}
$\sigma_x \times \sigma_y$ (beam cross sections at IP)	16 μm \times 16 μm

Number of interactions per collision

$$n = L \times \sigma_T (\text{pp}) / f \sim 10^{34} \times 100 \text{mb} / 40 \text{MHz} = 25 \text{ pp interactions}$$

より正確な luminosity の計算

$$L \text{ (luminosity)} = \frac{N_b^2 \cdot n_b \cdot f_{rev} \cdot \gamma_r}{4\pi \cdot \varepsilon_n \cdot \beta^*} F$$

N_b : number of particles per bunch = 1.15×10^{11}

n_b : number of bunches = 2808

f_{rev} : revolution frequency = $\frac{c}{l_{ring}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{26659 \text{ m}} = 11253 \text{ Hz}$

γ_r : relativistic gamma factor = $7000 / 0.938 = 7462.7$

ε_n : normalized transverse beam emittance = $3.75 \mu\text{m} \cdot \text{rad}$

β^* : beta function at IP = 0.55m

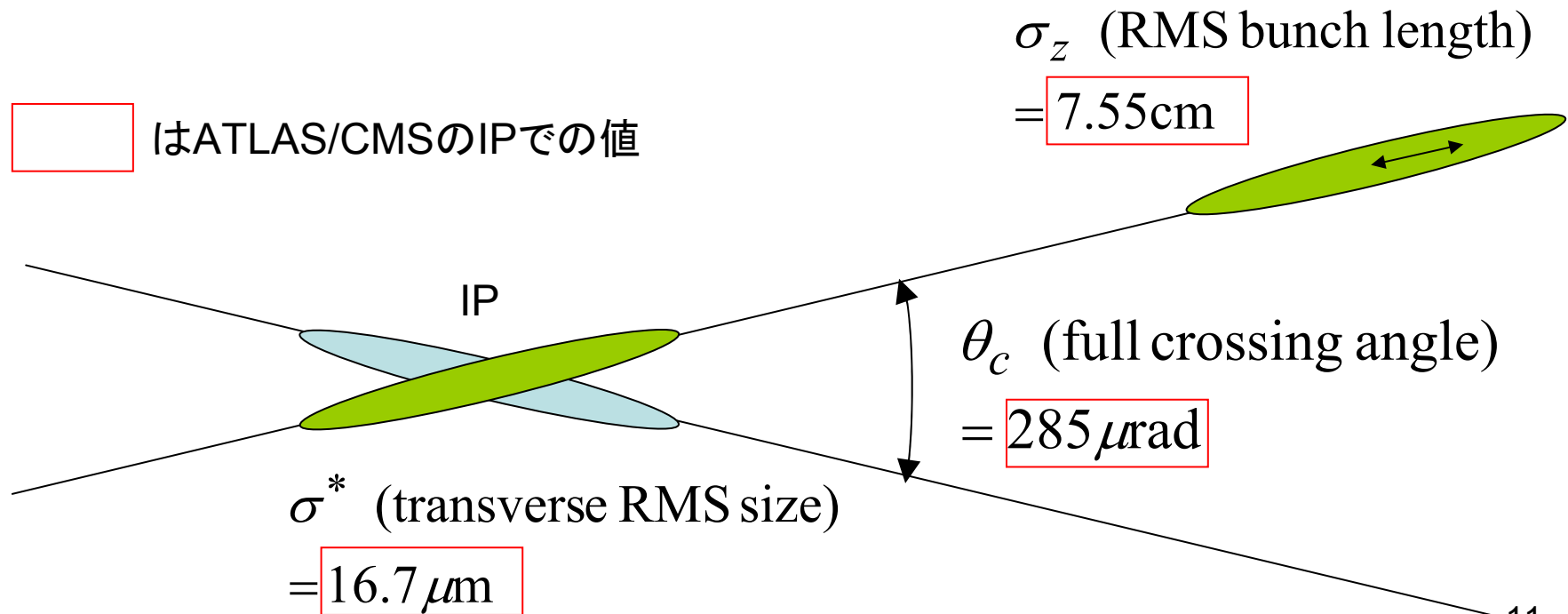
← Insertion magnet の口径から来ている

は ATLAS/CMS の IP での値

F : crossing angleによる geometric luminosity reduction factor

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{285 \mu\text{rad} \cdot 7.55 \text{cm}}{2 \cdot 16.7 \mu\text{m}}\right)^2}} = 0.841$$

□ はATLAS/CMSのIPでの値



Luminosityの公式にATLAS/CMSのIPの値を代入して

$$\begin{aligned} L &= \frac{N_b^2 \cdot n_b \cdot f_{rev} \cdot \gamma_r}{4\pi \cdot \varepsilon_n \cdot \beta^*} F \\ &= \frac{(1.15 \times 10^{11})^2 \cdot 2808 \cdot 11253 / s \cdot 7462.7}{4\pi \cdot 3.75 \mu m \cdot 0.55 m} \cdot 0.841 \\ &= 3.8 \times 10^{10+22+6} m^{-2} s^{-1} \\ &= 3.8 \times 10^{34} cm^{-2} s^{-1} \end{aligned}$$

計算値は 10^{34} に近くなるはずだが、factor違っている??

LHCでの各種interaction points

High luminosity IP (ATLAS, CMS)	: $10^{34} cm^{-2}s^{-1}$
Low luminosity IP (LHCb)	: $10^{32} cm^{-2}s^{-1}$
Low luminosity IP (TOTEM)	: $2 \times 10^{29} cm^{-2}s^{-1}$
Heavy Ion Pb-Pb (ALICE)	: $10^{27} cm^{-2}s^{-1}$

Luminosityの限界

- nonlinear beam-beam interactionによるtune shift

$$\xi = \frac{N_{bunch} \cdot r_p}{4\pi \cdot \varepsilon_n} < 0.015 / 3 = 0.005$$

ここで r_p : classical proton radius で3はIPの数

beam opticsからの限界 $\varepsilon_n < 3.75 \mu m$ を入れて

$$N_{bunch} < 0.015 / 3 = 0.005 \cdot 4\pi \cdot \varepsilon_n / r_p = 1.5 \times 10^{11}$$

(設計書では $N_{bunch} < 1.15 \times 10^{11}$ となっている)

RUN中のLuminosityの変化

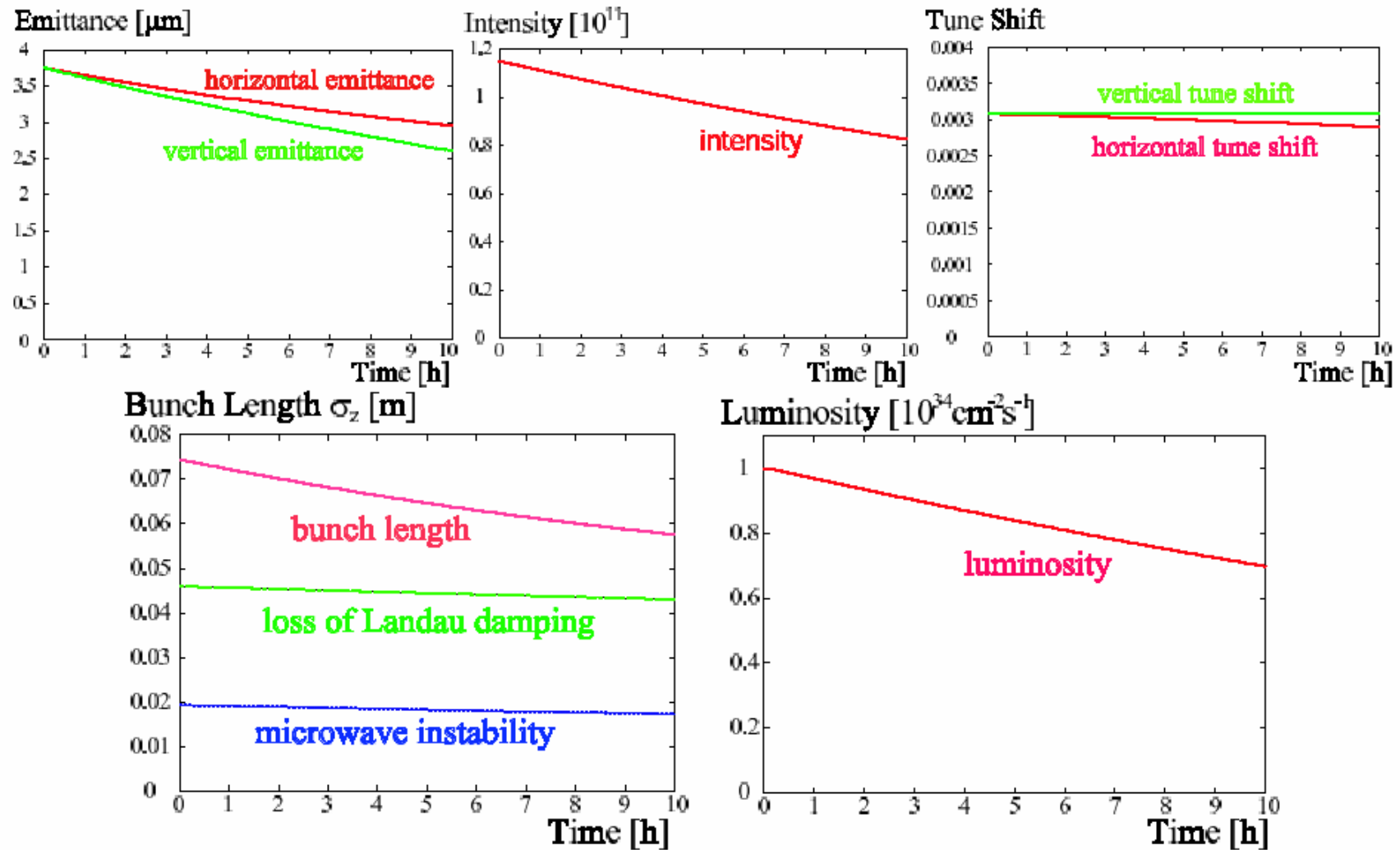


Figure 5.3: Evolution of normalized emittances (top left), bunch intensity (top centre), head-on beam-beam

Luminosityの積分値

Luminosityはpp interaction、beam-beam interaction、beam-gas interactionによって次第に減少する。

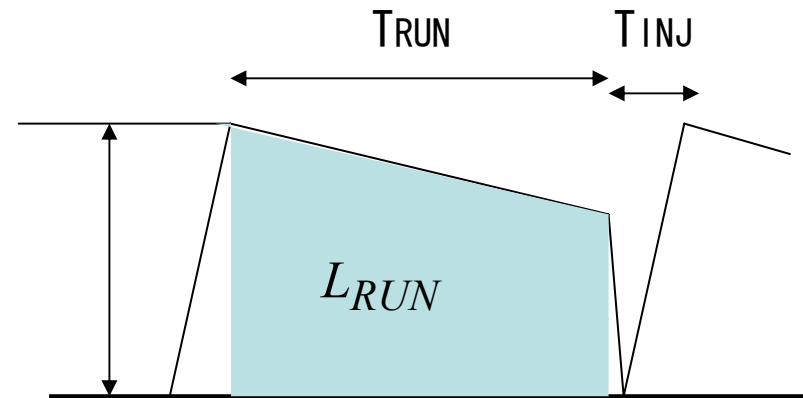
$$\frac{1}{\tau_L} = \frac{1}{\tau_{\text{nuclear,1/e}}} + \frac{1}{\tau_{\text{IBS}}} + \frac{2}{\tau_{\text{rest-gas}}} \approx \frac{1}{29\text{h}} + \frac{1}{80\text{h}} + \frac{2}{100\text{h}} = \frac{1}{14.9\text{h}}$$

τ_L はluminosity lifetime。Runあたりの積分luminosity L_{RUN} は

$$L_{\text{run}} = L_0 \cdot \tau_L \cdot \left(1 - e^{-T_{\text{RUN}}/\tau_L}\right)$$

1年間の積分luminosityは

$$L_{\text{tot}} = \frac{200\text{day} \times 24}{T_{\text{RUN}} + T_{\text{INJ}}} L_{\text{run}}$$



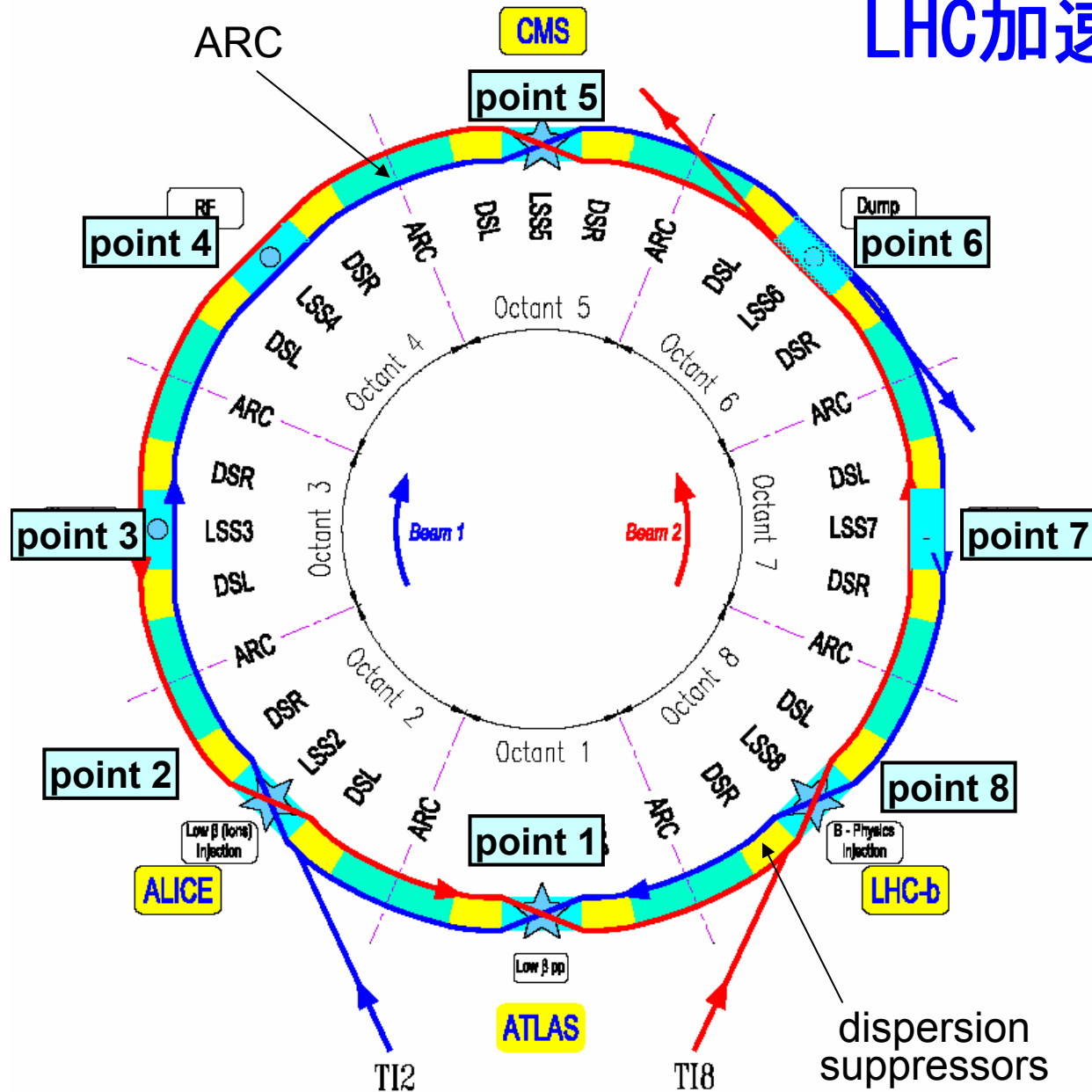
$L_0=10^{34}$, $\tau_L = 15\text{h}$ のとき L_{tot} の最大値は

$$T_{\text{INJ}} = 1.2\text{h}\text{の場合} \quad T_{\text{RUN}} = 5.5\text{h} \quad T_{\text{tot}} = 120\text{fb}^{-1}$$

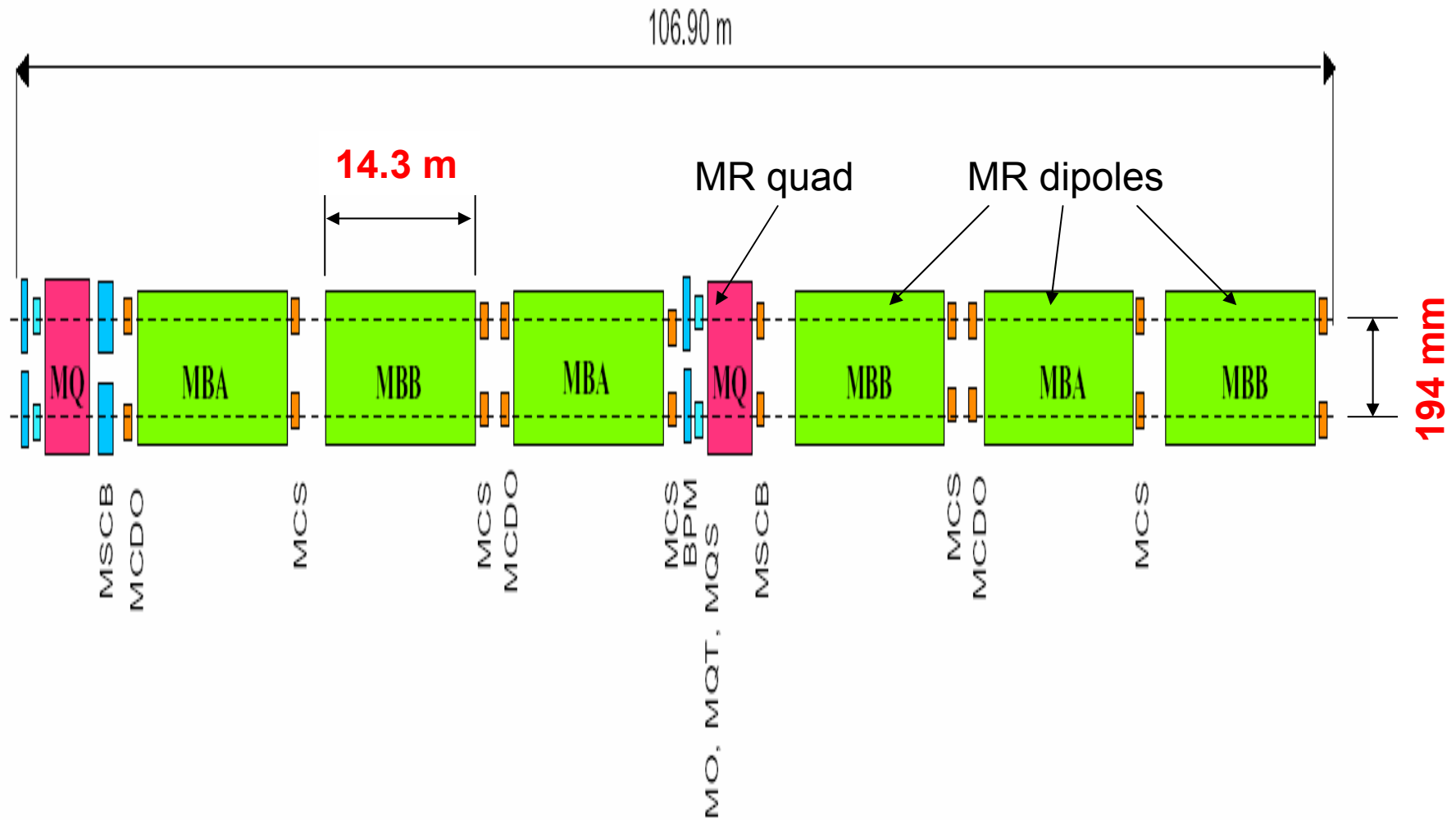
$$T_{\text{INJ}} = 7\text{h}\text{の場合} \quad T_{\text{RUN}} = 12\text{h} \quad T_{\text{tot}} = 80\text{fb}^{-1}$$

HERAの経験

LHC加速器のLayout



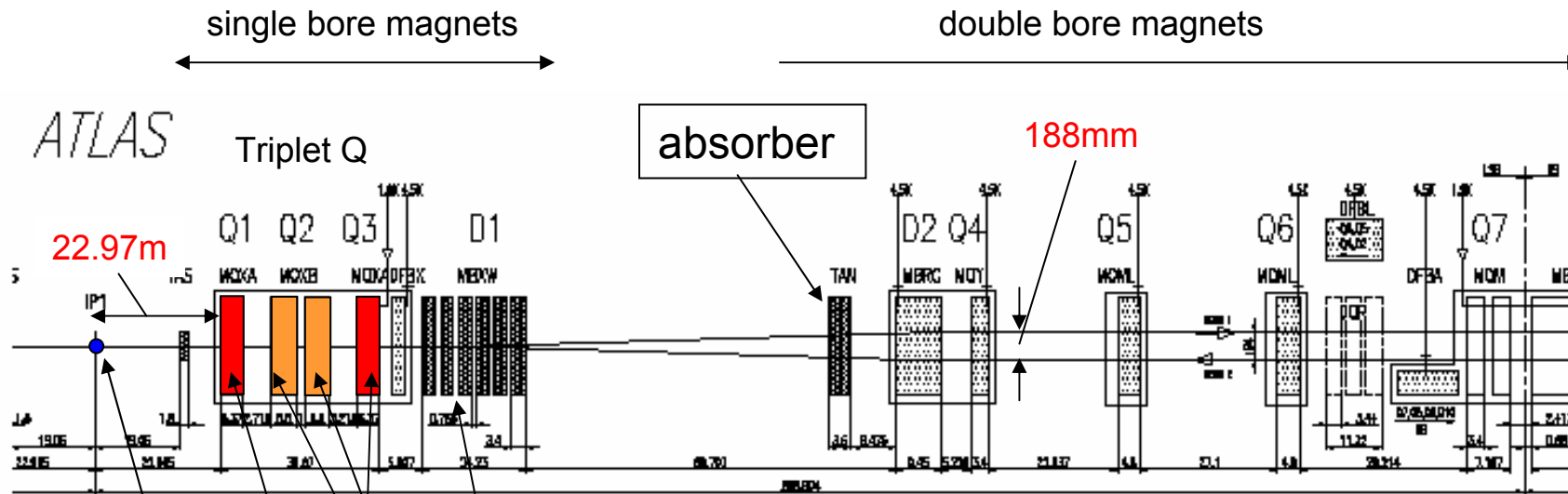
- 8 straight sections (~528m)
- Point 1:** ATLAS, low β
 - Point 2:** ALICE beam injection
 - Point 3:** beam collimators
 - Point 4:** RF system
 - Point 5:** CMS, low β
 - Point 6:** beam dump
 - Point 7:** beam collimators
 - Point 8:** LHCb beam injection



ARC部の1 cellの構造

Lattice design v6.4, 23 cells/octant

Low- β interaction pointの構造



~70 m

ビーム分離のためのダイポール(常温)

Fermilab製のinsertion quad (205T/m, 1.9K, 5.5m)

KEK製のinsertion quad (205T/m, 1.9K, 6.3m)

衝突点(ATLASではvertical交差、CMSではhorizontal交差)



東芝京浜工場でのcoil winding



KEKでの1.9Kでの励磁・磁場測定

日本で18台を製作終了した超伝導 Insertion Quad

Fermilabに輸送され共通クライオスタットに組み込み中

シンクロトロン光放射

陽子加速器としてはLHCが初めてシンクロトロン放射が問題になる加速器である。
 一般に半径 ρ で回る質量 m 、エネルギー E の粒子は1周で

$$U_0 = \frac{2\alpha hc}{3\rho} \left(\frac{E}{m}\right)^4 = \frac{2 \cdot 1/137 \cdot 197 [\text{MeV} \cdot \text{fm}] 2\pi \left(\frac{7000}{0.938}\right)^4}{3 \cdot 2804 m} = 6.7 \text{ keV}$$

ここではダイポールマグネットの曲率半径 $\rho=2804\text{m}$ を代入した。1リングあたりのシンクロトロン放射の全エネルギーは、

$$P_{SR} = U_0 N_B N_p f = 6.7 \text{ keV} \cdot 2808 \cdot 1.15 \times 10^{11} \cdot 11253 / s \approx 3900 \text{ W}$$

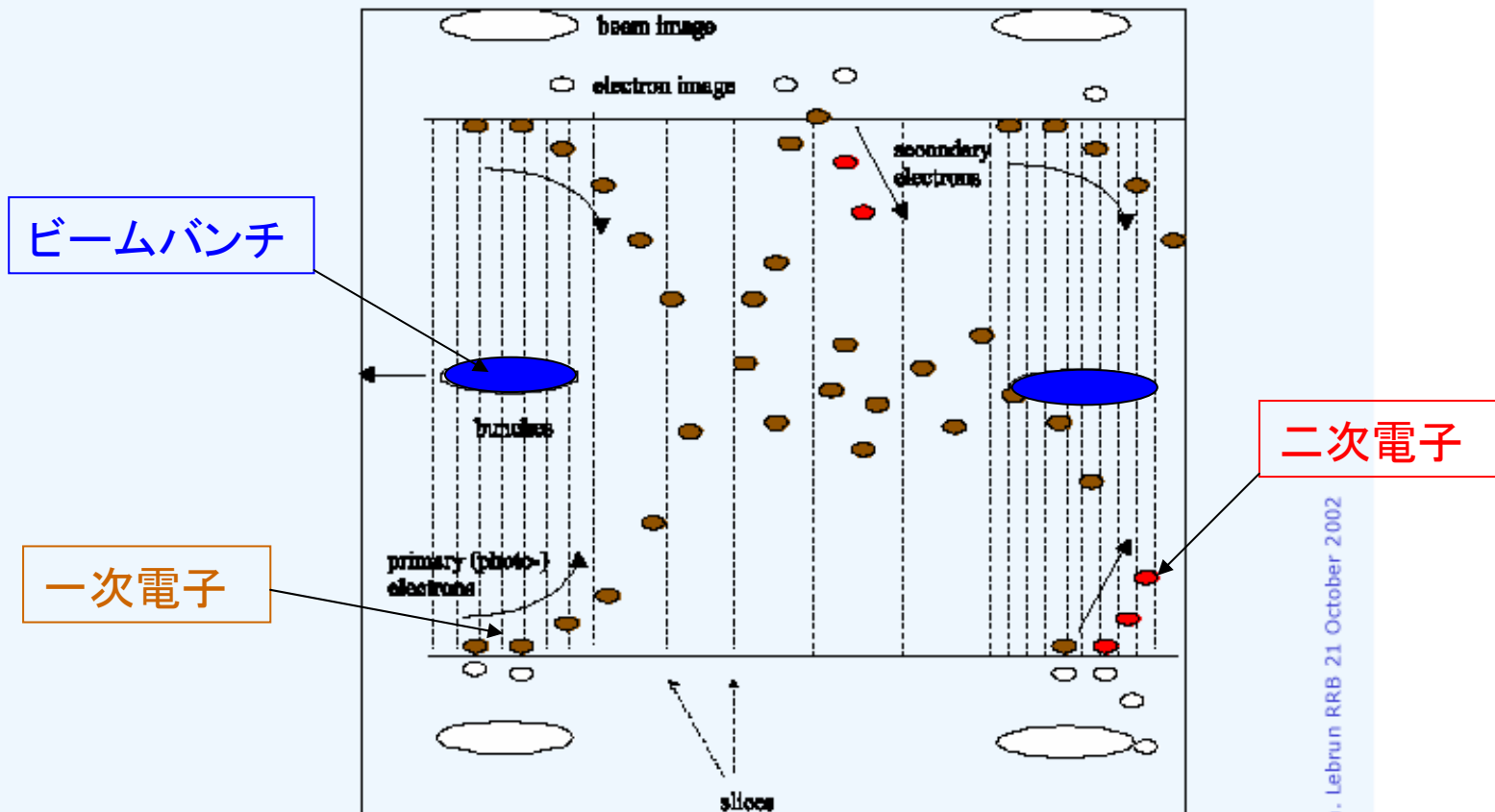
まとめ	450 GeV	7 TeV
Total SR power/beam	0.066 W	3886 W
Arc部でのenergy loss		0.22 W/m
Energy loss per turn	0.11 eV	6.7 keV
Photon critical energy	0.01 eV	43.13 eV
Longit. ε damping time	5.5 yr	12.9 h
Transv. ε damping time	11 yr	26 h

クライオへの負荷

7 TeVでは
放射光は
ビーム冷却に
役立つ！

Electron Cloud Effects (電子雲効果)

LHCではバンチ間隔が25nsと狭いので、ビームパイプ表面から出た電子が **beam-induced multipacting** 効果のために二次電子を作り出して、多くの電子がビームパイプの中に溜まってしまう現象。熱負荷やビーム不安定性を引き起こす。KEK-BやPEP-IIでも電子雲で加速器の性能が制限されている。



ビームバンチ

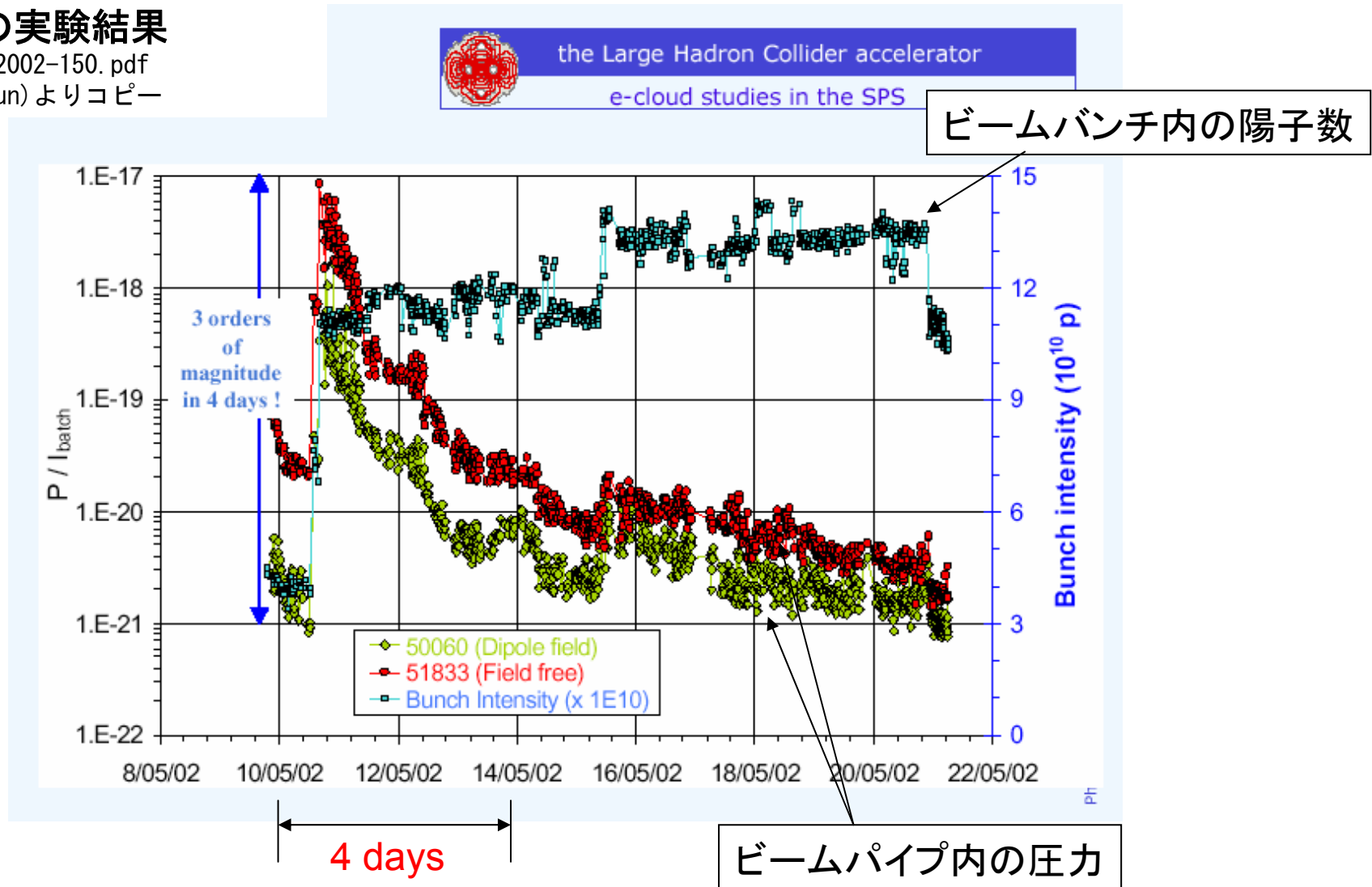
一次電子

二次電子

Electron Cloud Effects (電子雲効果) 2

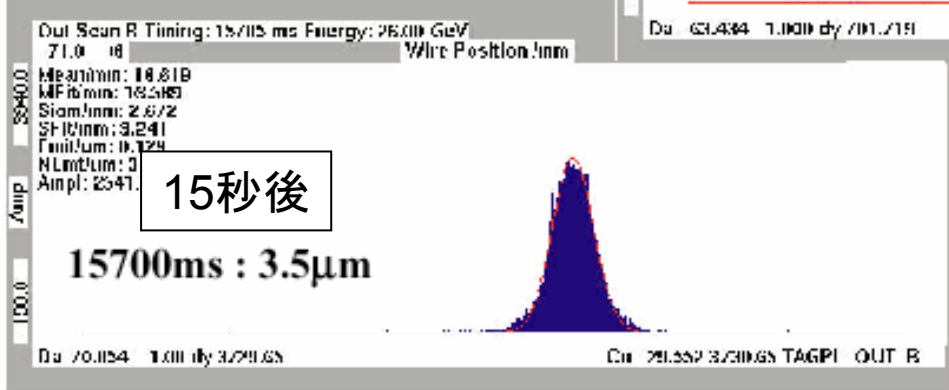
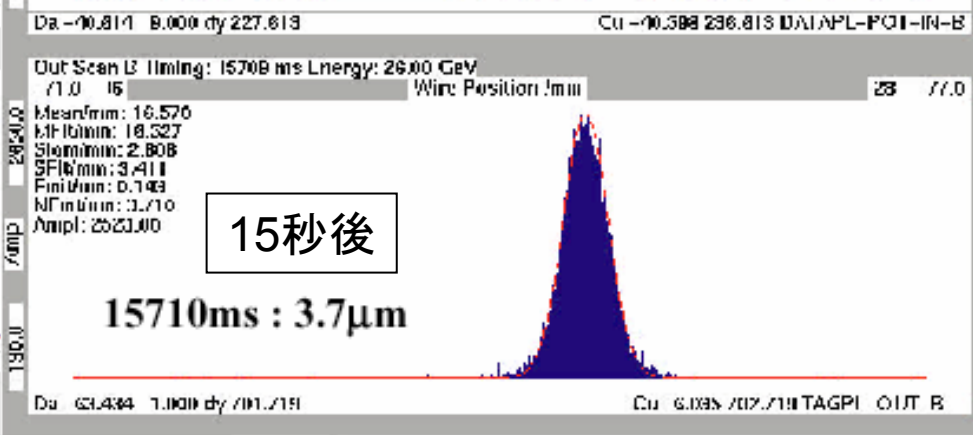
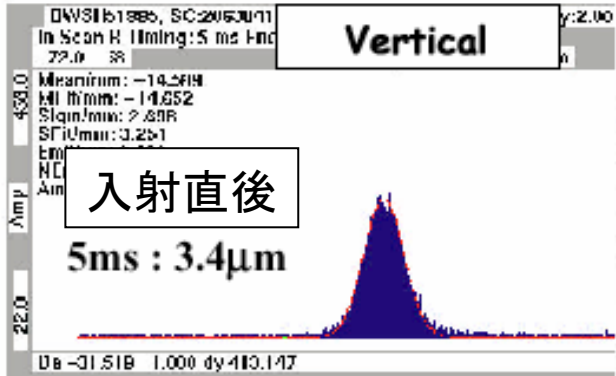
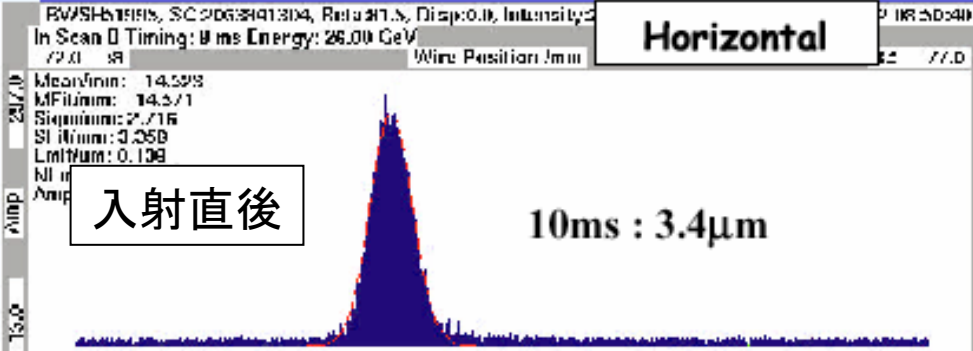
SPSでの実験結果

CERN-RRB-2002-150. pdf
(Ph. Lebrun) よりコピー



テスト結果: ビーム開始直後には電子雲による圧力が急上昇するが、
数日運転すれば電子雲効果は小さくなり、 $10^{11} p/\text{bunch}$ が可能になる。

Emittance Preservation (Almost)

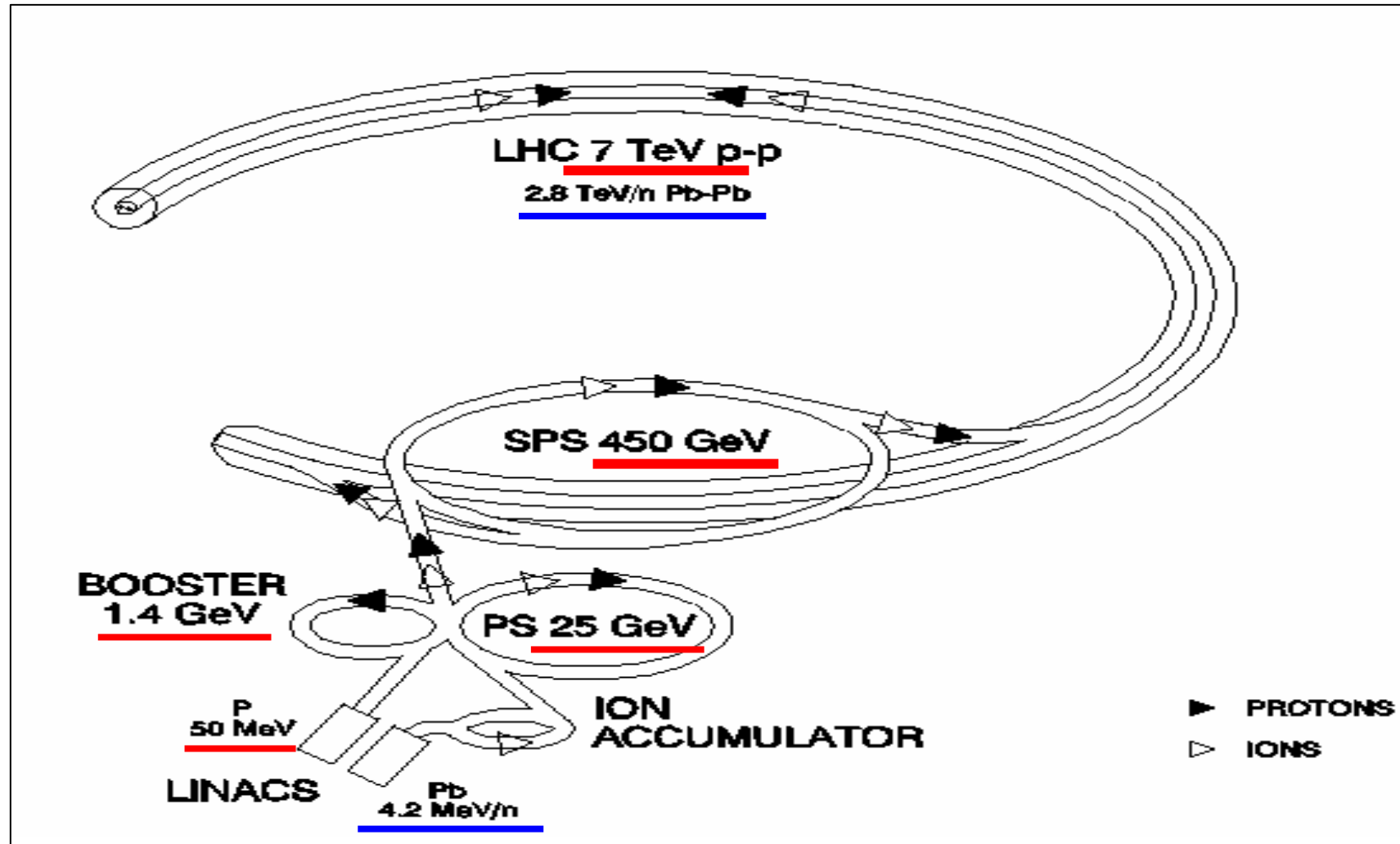


2 Batches of 72 bunches with 1.3×10^{11} protons/bunch

PS Emittance : $\sim 3.2 \mu\text{m}$

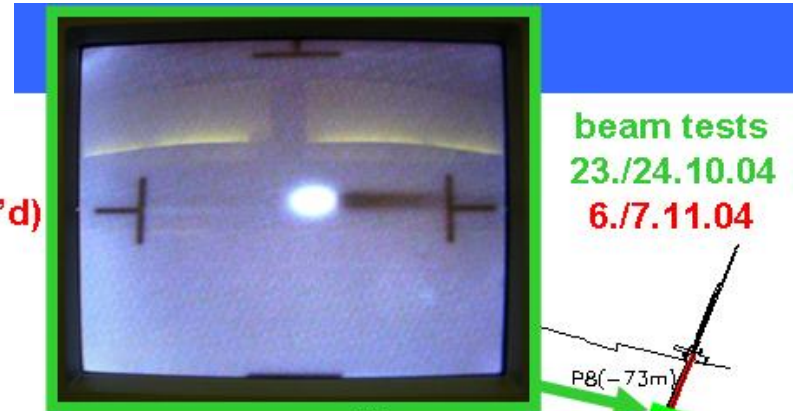
Ph. Lebrun RRB 21 October 2002

LHC加速器のinjector群

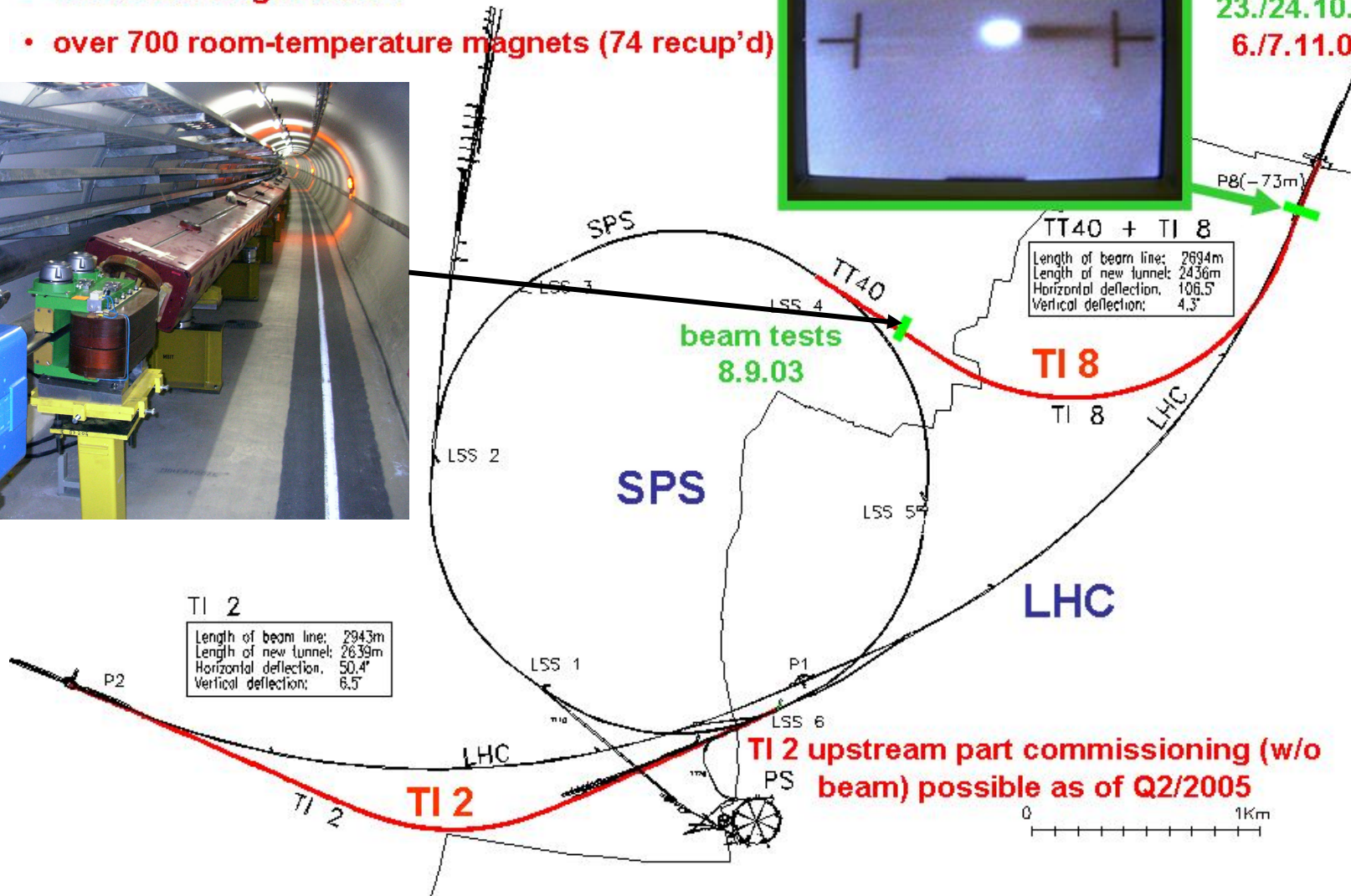


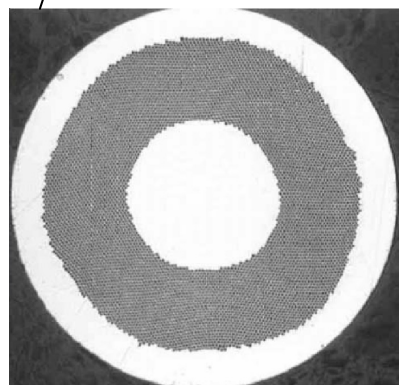
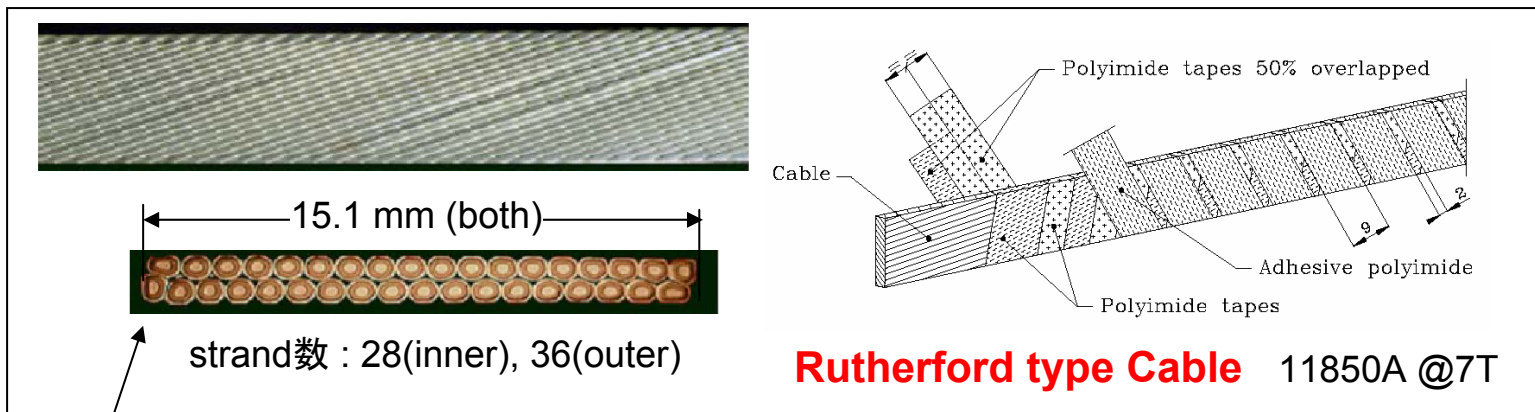
LHCへのTI8入射ラインは完成し ビーム輸送テストにも成功した。

- combined length 5.6 km
- over 700 room-temperature magnets (74 recup'd)

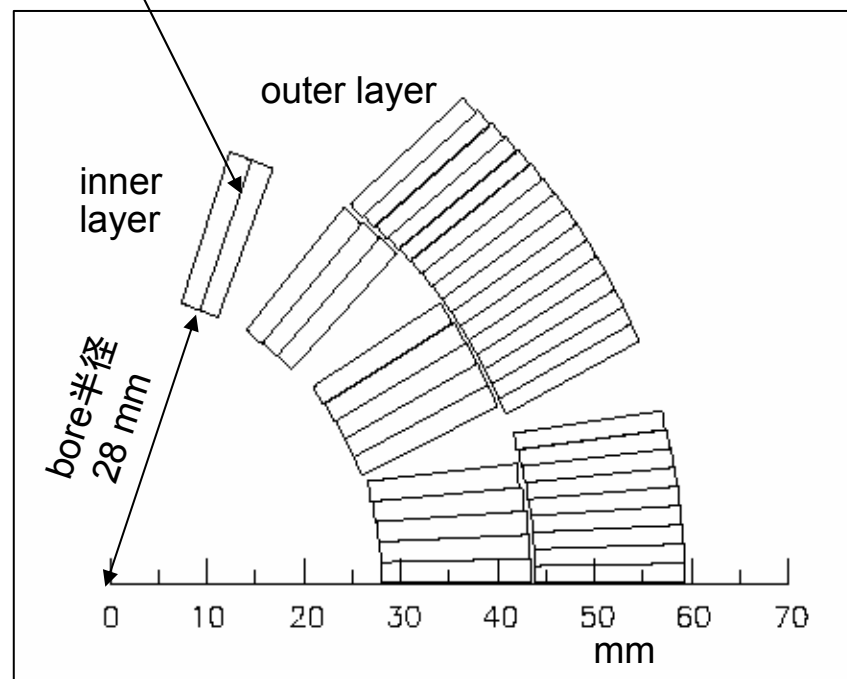


beam tests
23./24.10.04
6./7.11.04

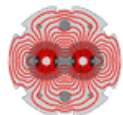




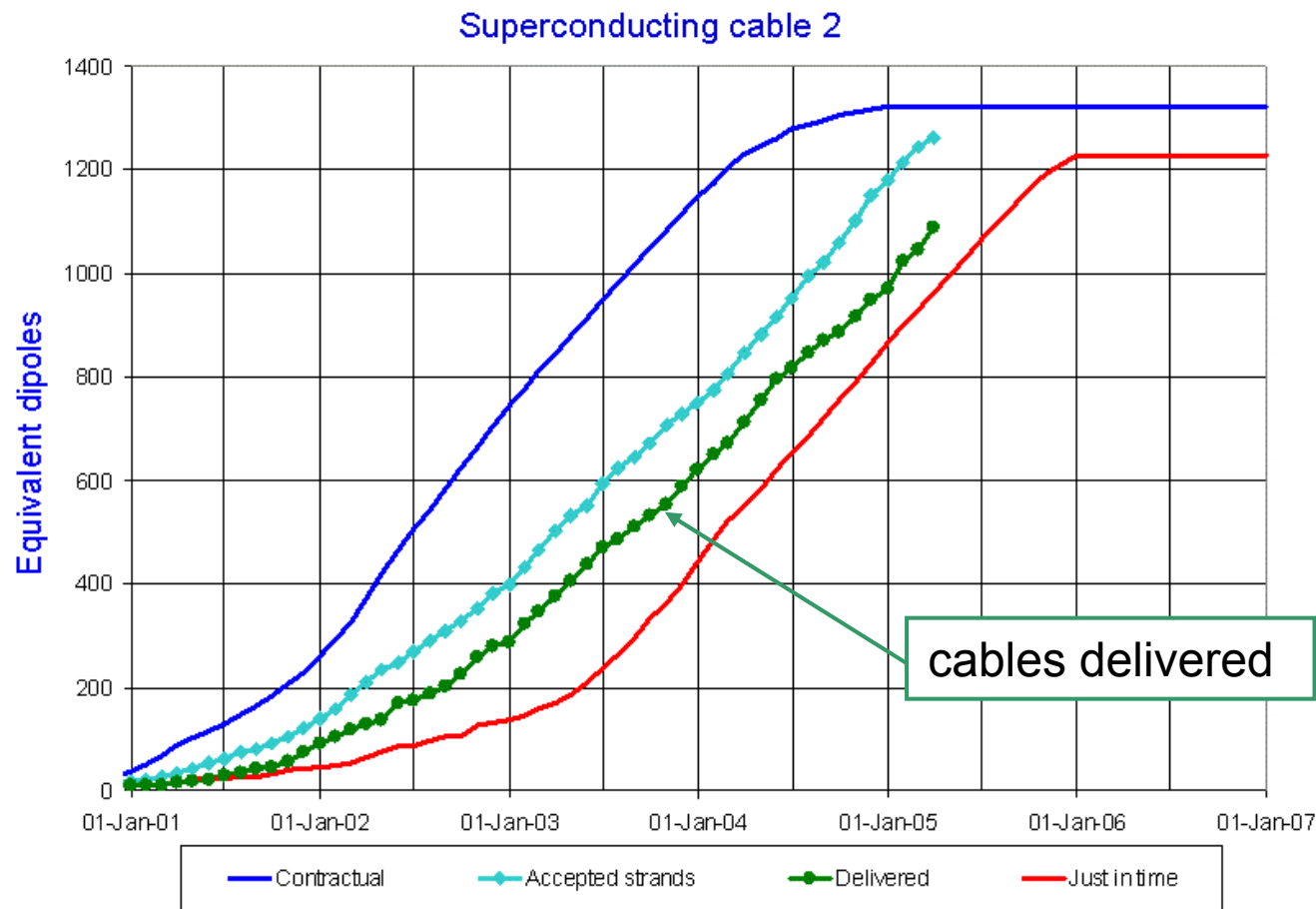
Strand inner, outer
 filament数: 8900, 6500本
 filament径: 7, 6 μm
 Cu/NiTi: 1.65, 1.95
 Diameter: 1.065, 0.825 mm



Main Dipole (MB)の超伝導コイル部



超伝導ケーブルの納入状況



古河電気工業
はこのケーブル
の供給元の一つ

Updated 31 Mar 2005

Data provided by A. Verweij AT-MAS

LHC Progress Dashboardを見れば加速器建設の現状がわかる。

<http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/DashBoard/index.asp>

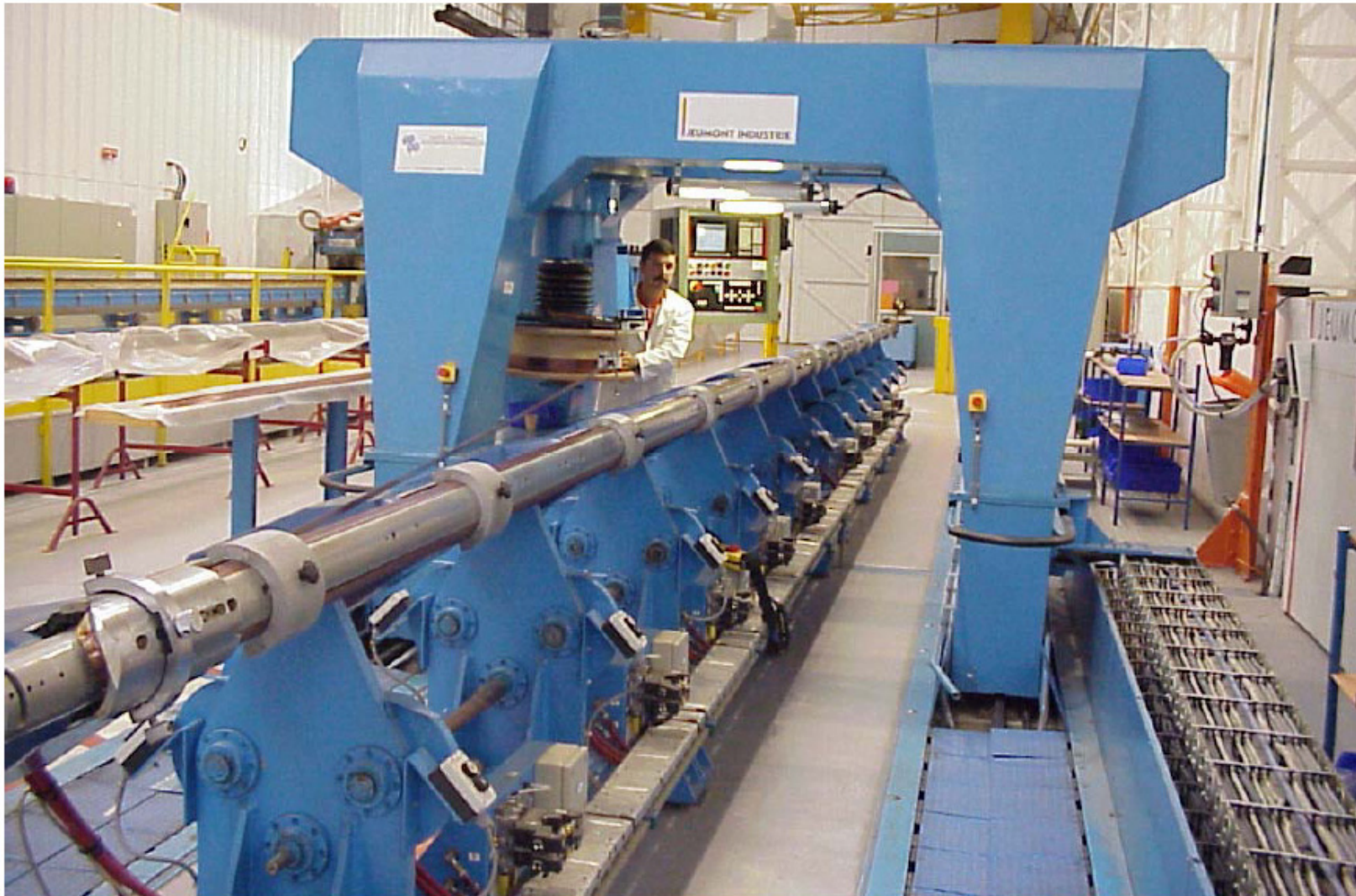


Figure 7.7: A winding machine for the superconducting coils

Winding machine

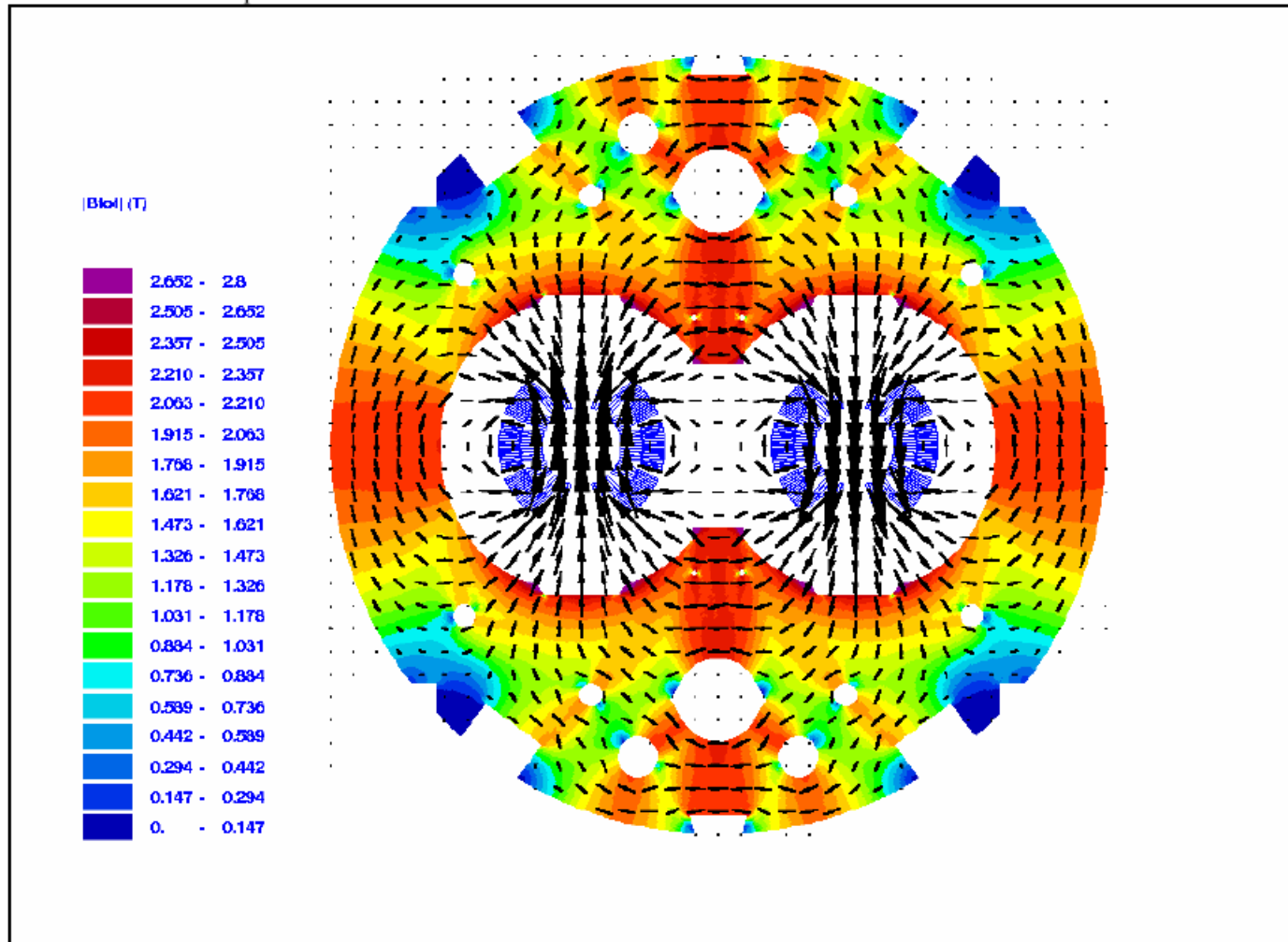
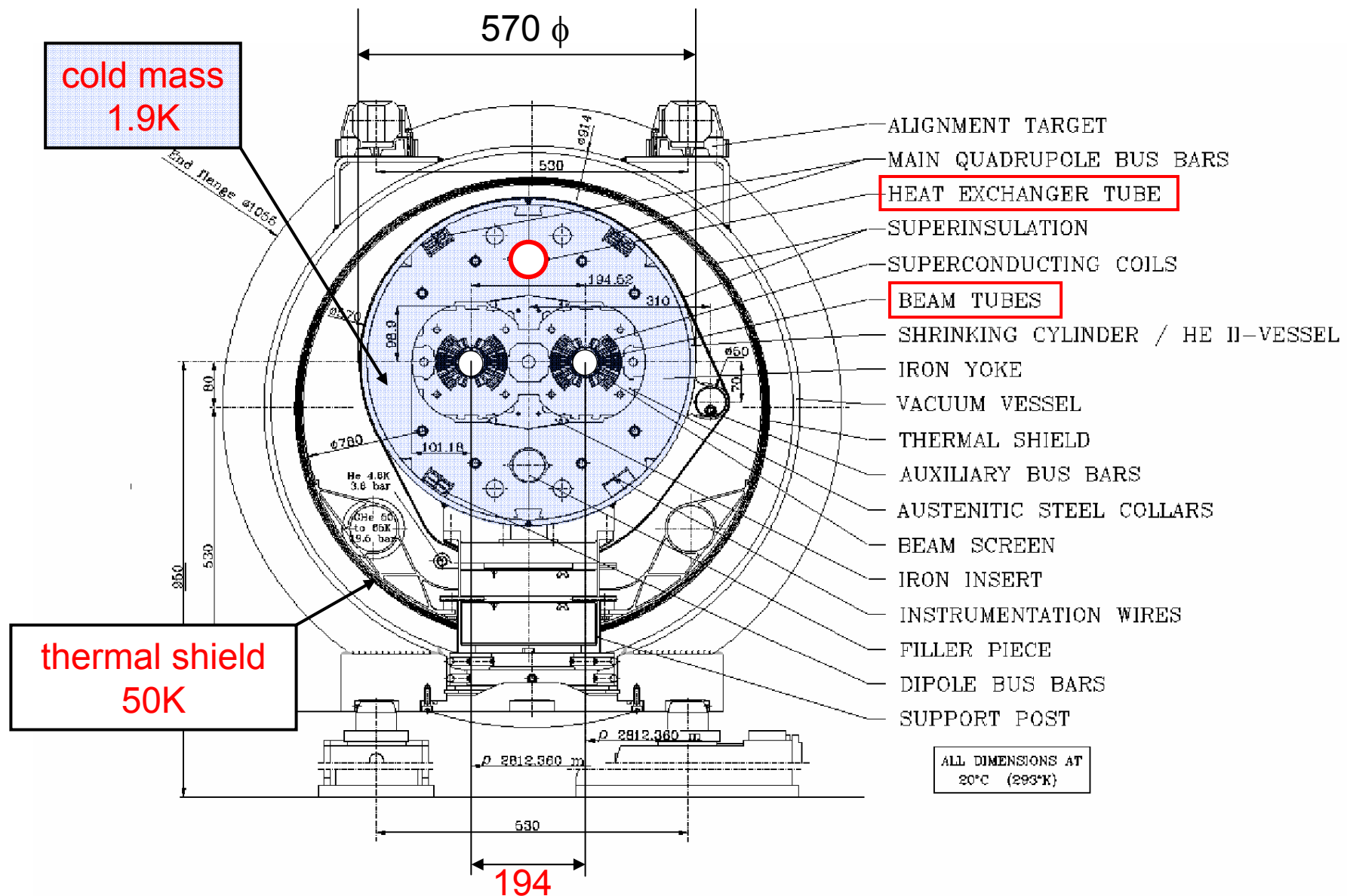


Figure 7.5: Dipole magnetic flux plot

Main Dipoleの磁場分布



Main Dipole (MB)断面図

e

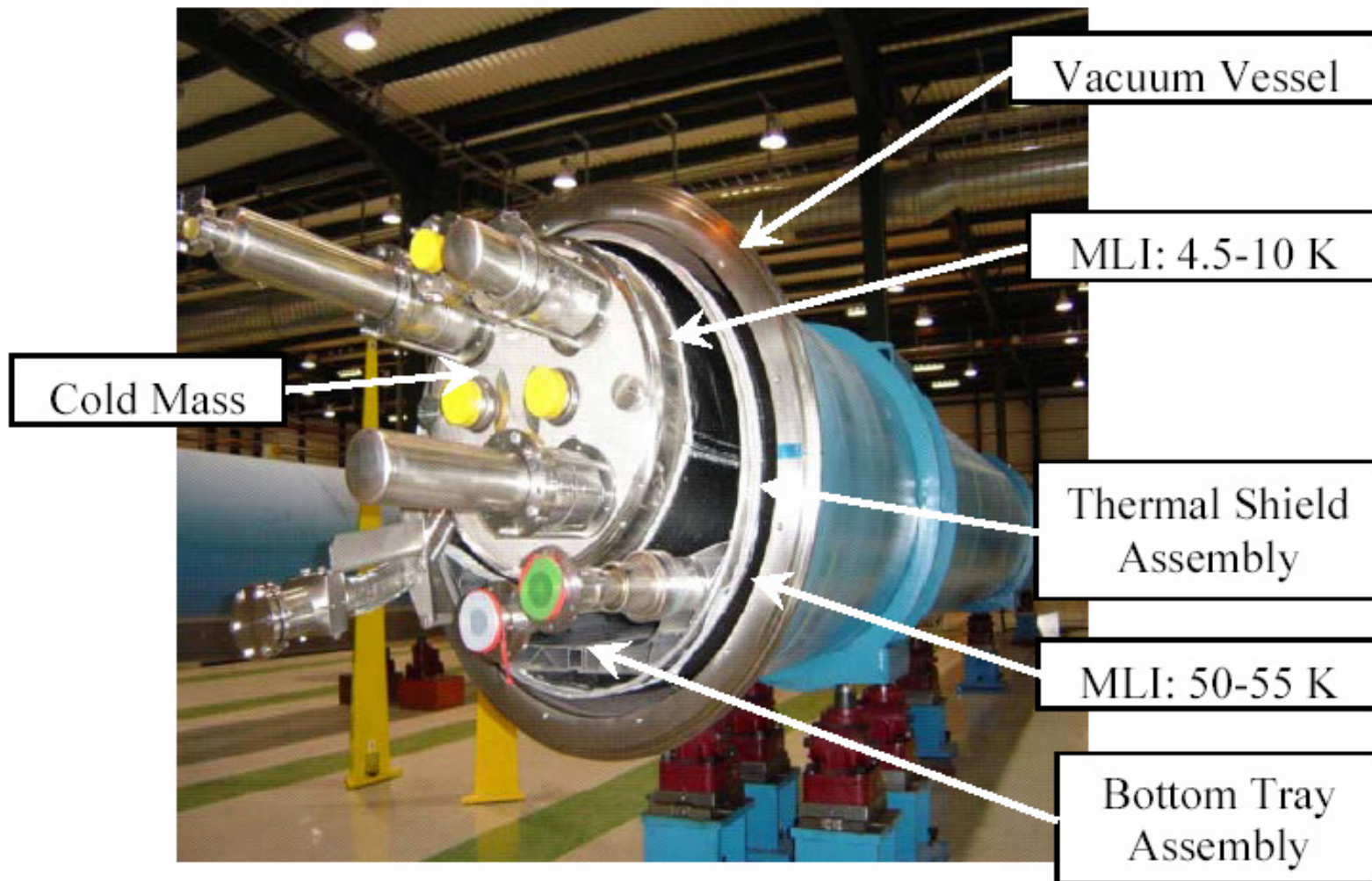
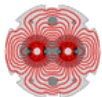


Figure 7.12: LHC dipole cryomagnet Assembly

超伝導ダイポールの生産：3社で10台/週のペース

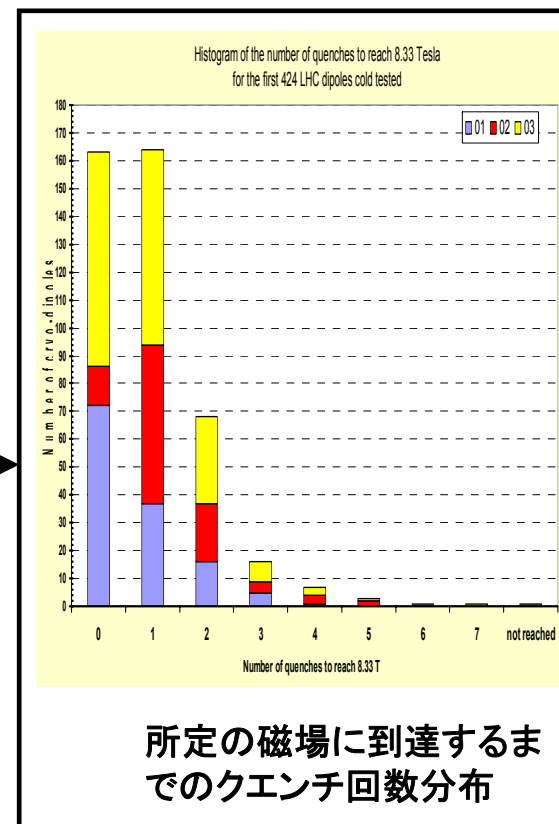
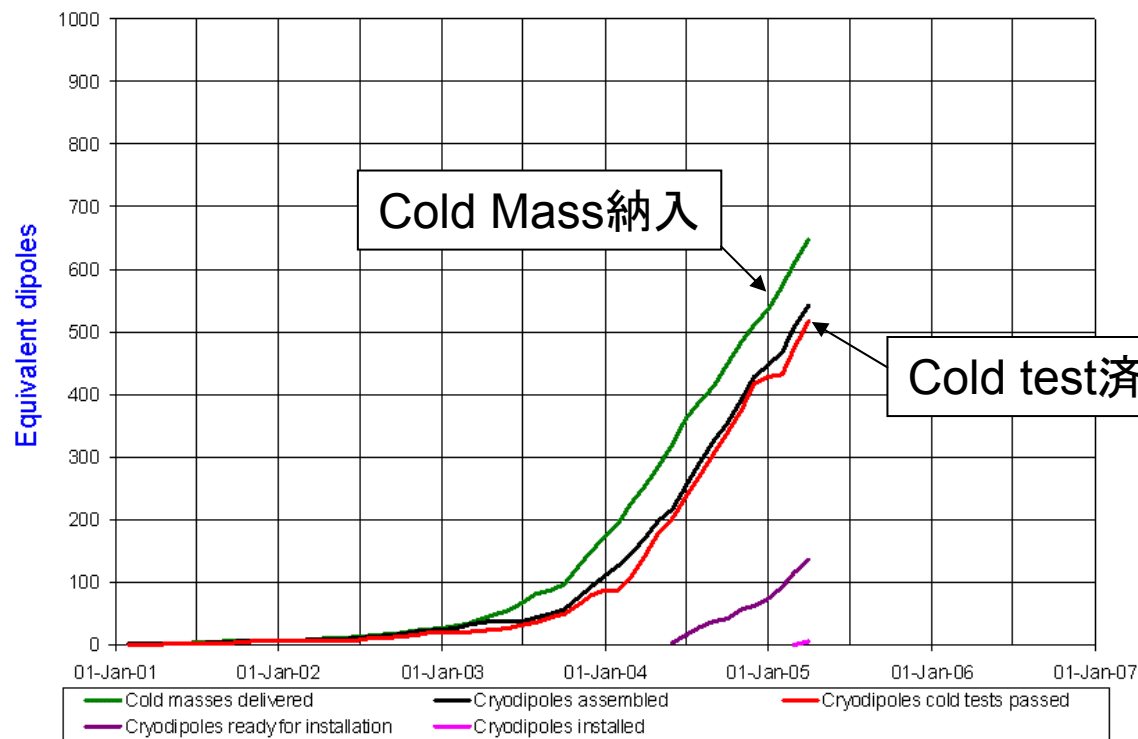
Babcock Noell Nuclear (独), Alstom (仏), Ansaldo (伊)



LHC Progress
Dashboard



Cryodipole overview

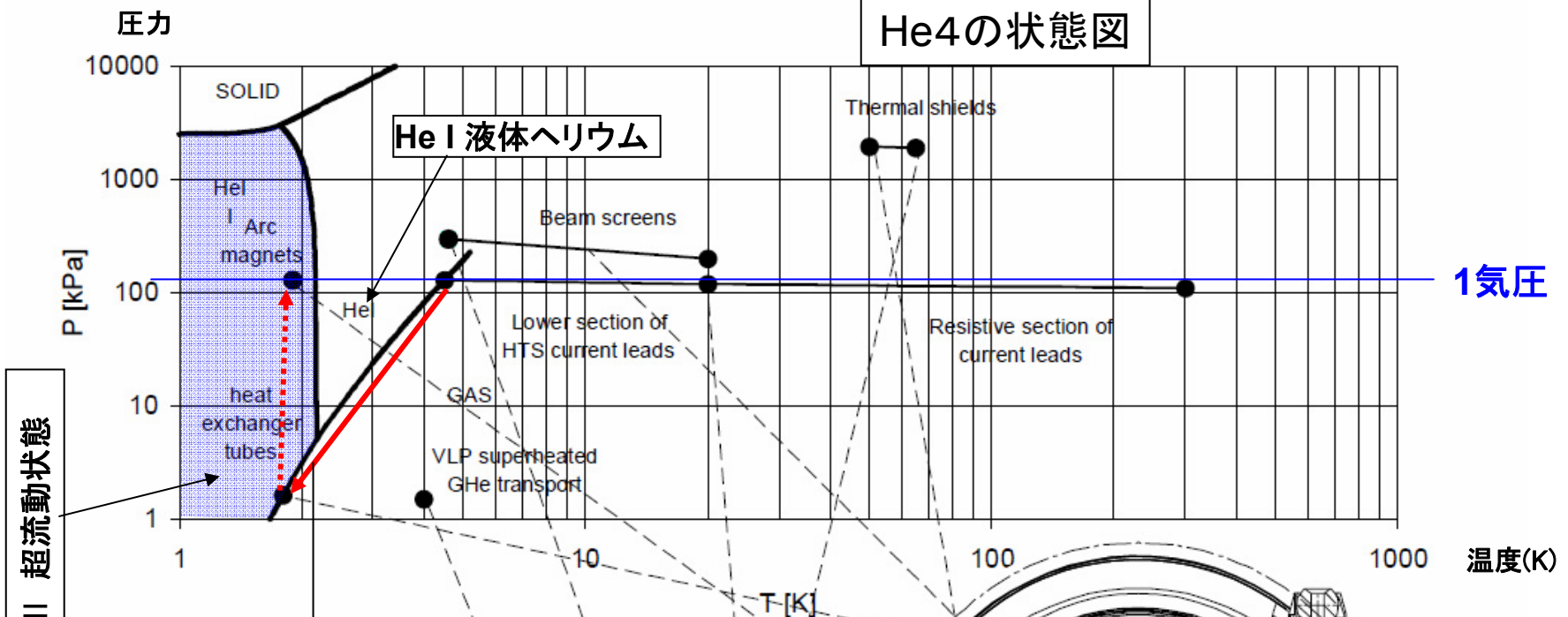


所定の磁場に到達するまでのクエンチ回数分布

Updated 31 Mar 2005

Data provided by D. Tommasini AT-MAS

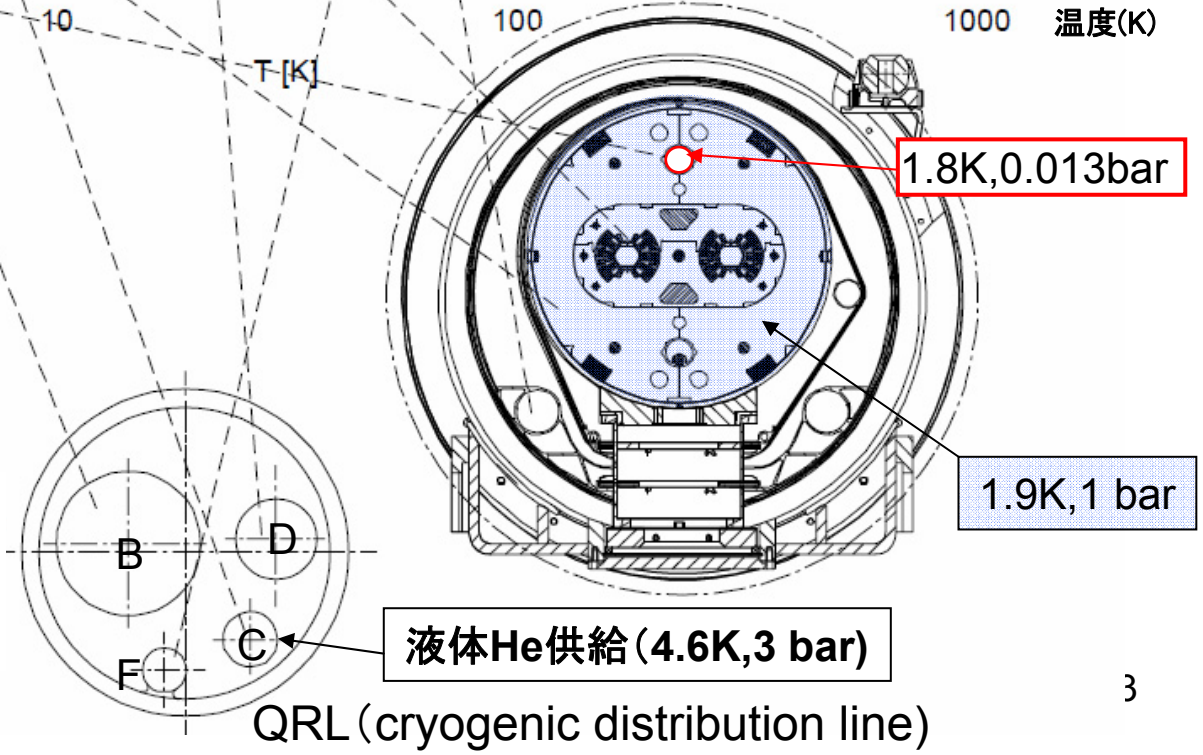
He4の状態図



He II 超流動状態

Heat Exchanger Tubeの中を真空引きによって温度を下げ、Tubeの壁を通しての熱交換によって1.9K,1気圧の状態を実現するのがキーポイント。

- ・HeIIの熱伝導率特性は1.9Kが最大である。
- ・超伝導ケーブルの比熱は4.5Kの半分でよりクエンチし易くなる。



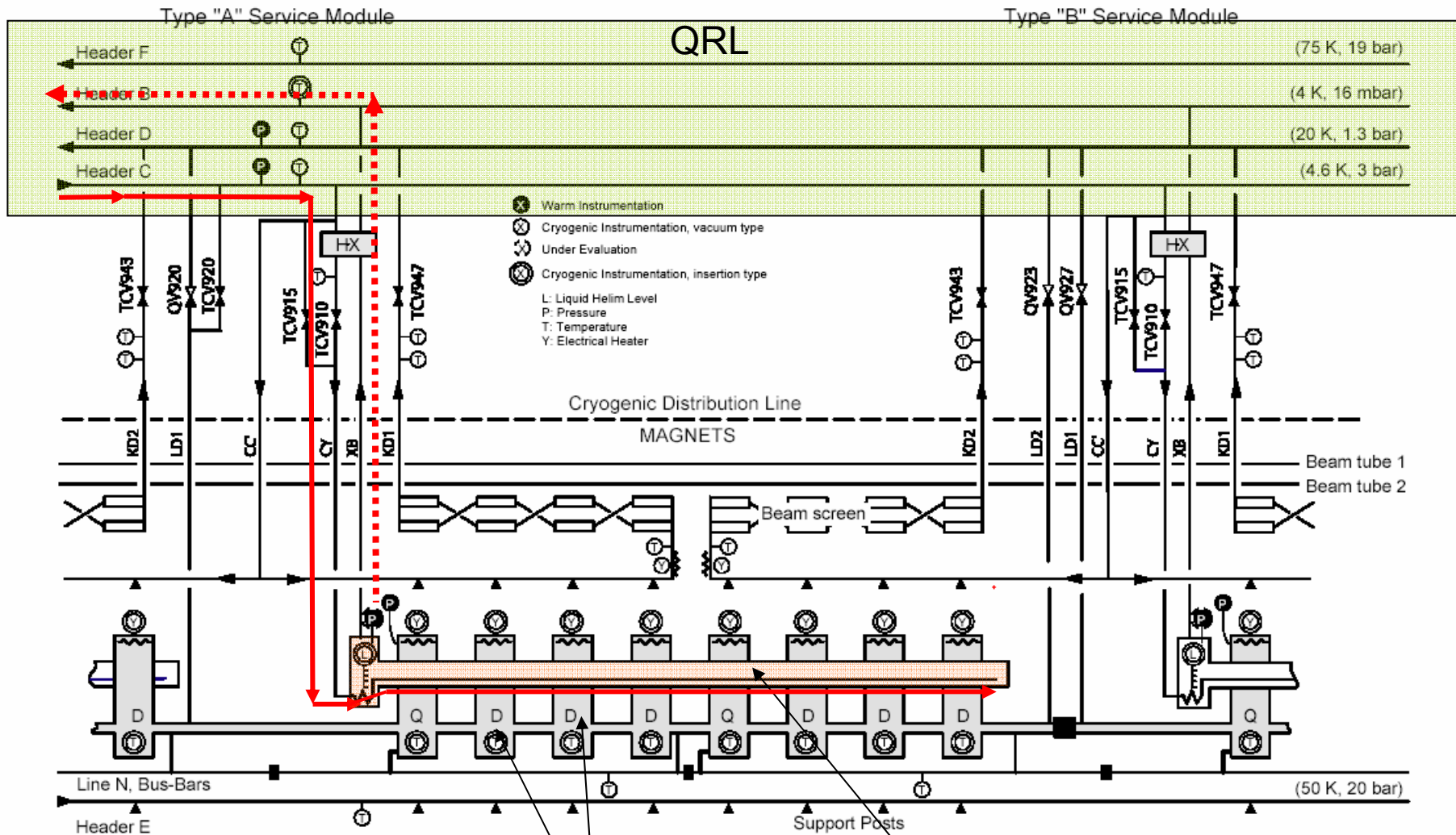


Figure 11.5: Cryogenic flow-scheme and instrumentation of a LHC lattice cell

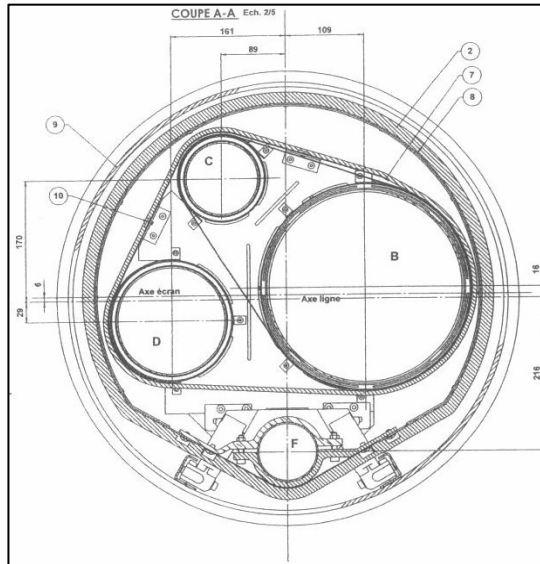
超伝導マグネット

Heat exchanger tube

超流動ヘリウム冷却システム

Cryoline (QRL) のトラブル

2004年6月にAir Liquid社が設置したが、真空リークやスライド板の割れが発生して全てやり直し。



2004年11月に修理・改善プランが確定。追加コストは40.6MCHF。

Installation of « validation cells » in sector 8-1

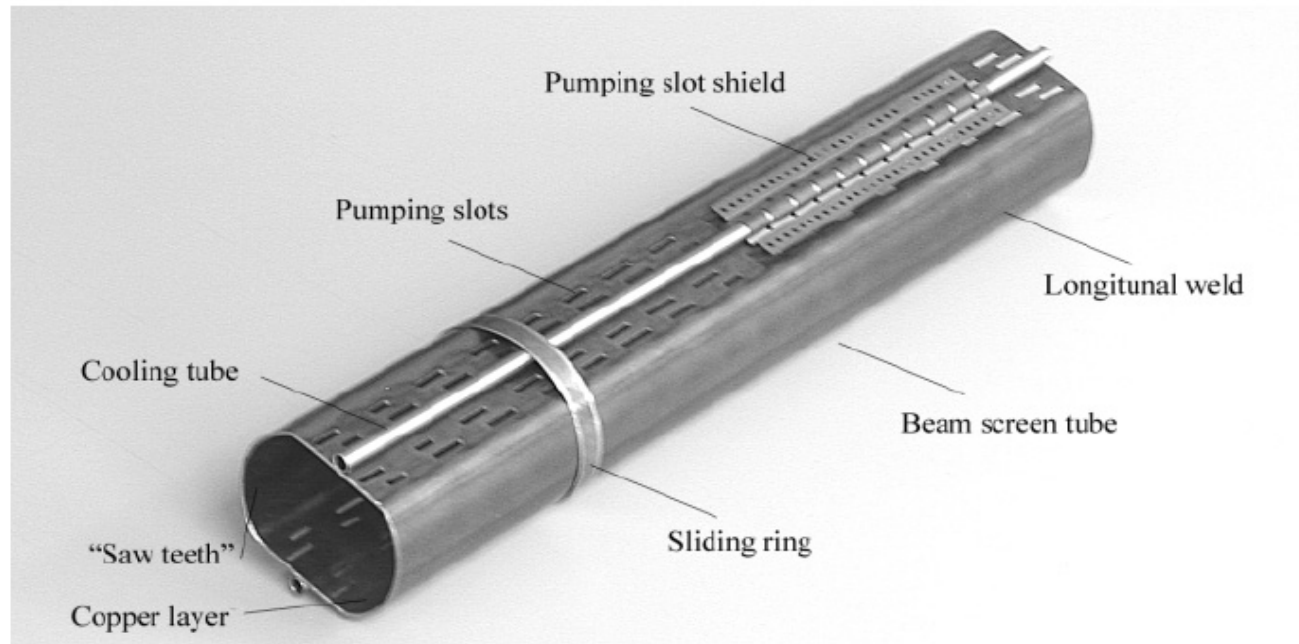


Figure 12.1: Conceptual design of the LHC beam screen

ビームパイプ内に設置されるBeam Screen

LHC加速器の主要パラメーターのまとめ

主リング周長	26658.883 m
陽子ビームエネルギー(入射エネルギー)	7.0 TeV (450 GeV)
最高ルミノシティ (IP1, IP5)	$1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
バンチ間隔	25 nsec、40 MHz
バンチ数	2808 /ring
バンチ当りの陽子数	1.15×10^{11}
ビームエミッタンス(7 TeV)	$3.75 \times 10^{-6} \mu \text{ mrad}$
二口径双極電磁石	1232台
双極電磁石長、磁場	14.3 m, 8.33 Tesla
曲げ半径	2803.95 m
回転周波数	11.245 kHz
RMSビームサイズ(IP1, IP5)	16.7 μm
RMSバンチ長さ(IP1, IP5)	7.55 cm
ビーム衝突角度(IP1, IP5)	$\pm 142.5 \mu\text{rad}$
交差平面(ATLAS, CMS)	垂直(ATLAS),水平(CMS)
バンチ衝突当りの陽子衝突数	19
全ルミノシティ-寿命	14.9 hour
シンクロトロン放射損失エネルギー	3.6 kW / ring, 6.71 keV/turn

