

LHC高輝度化アップグレード High Luminosity LHC Upgrade

— 加速器への貢献 —

超伝導低温工学センター
中本 建志

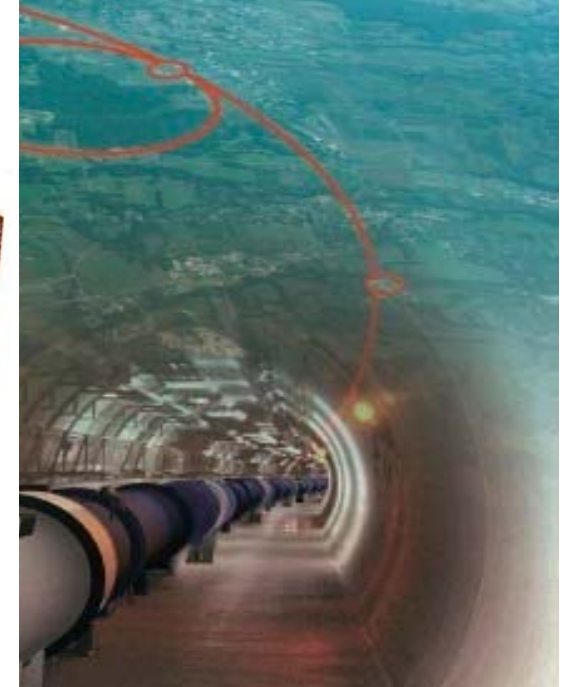
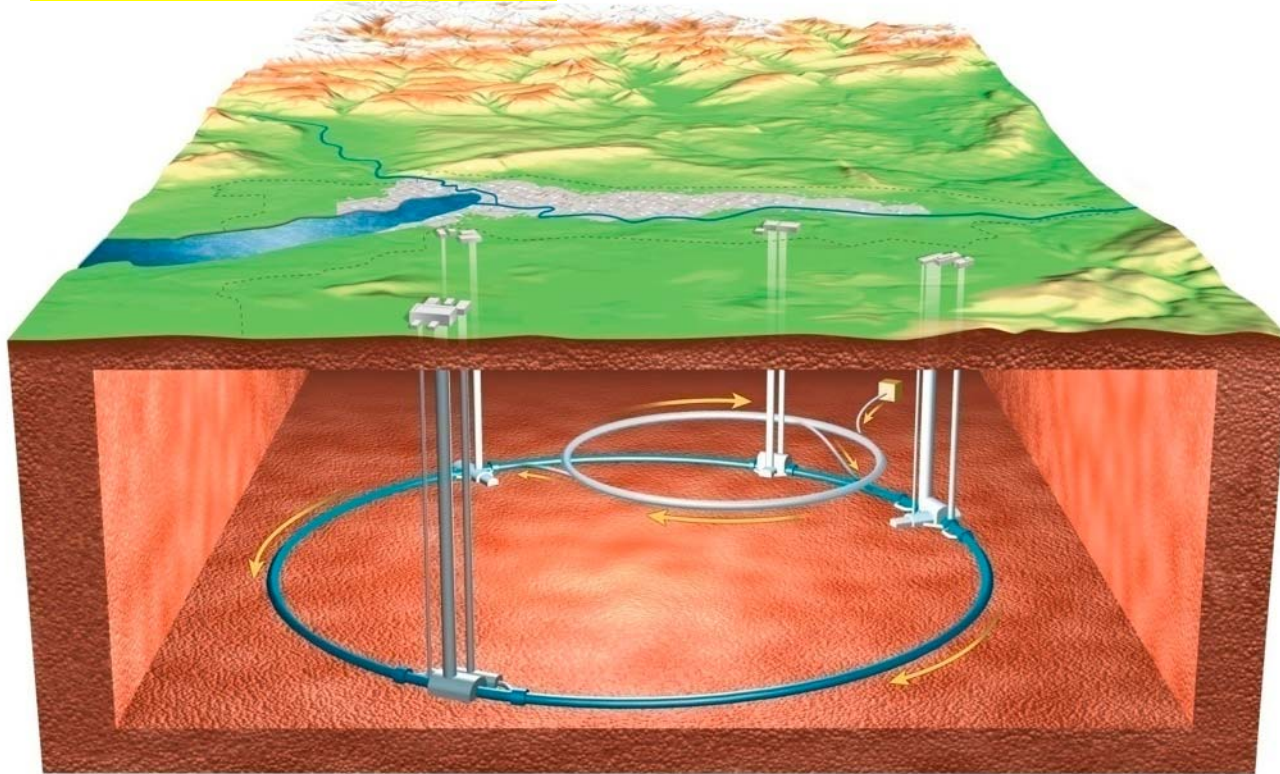
目次

- **LHCの概要**
- LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)
- KEKからの貢献： 現状と計画
 - 加速器
 - 超伝導磁石
- まとめ

LHC (Large Hadron Collider)

proton + proton collision

Circumference of
27 km



Origin of mass ?
What is dark matter, dark energy?

Overview: LHC

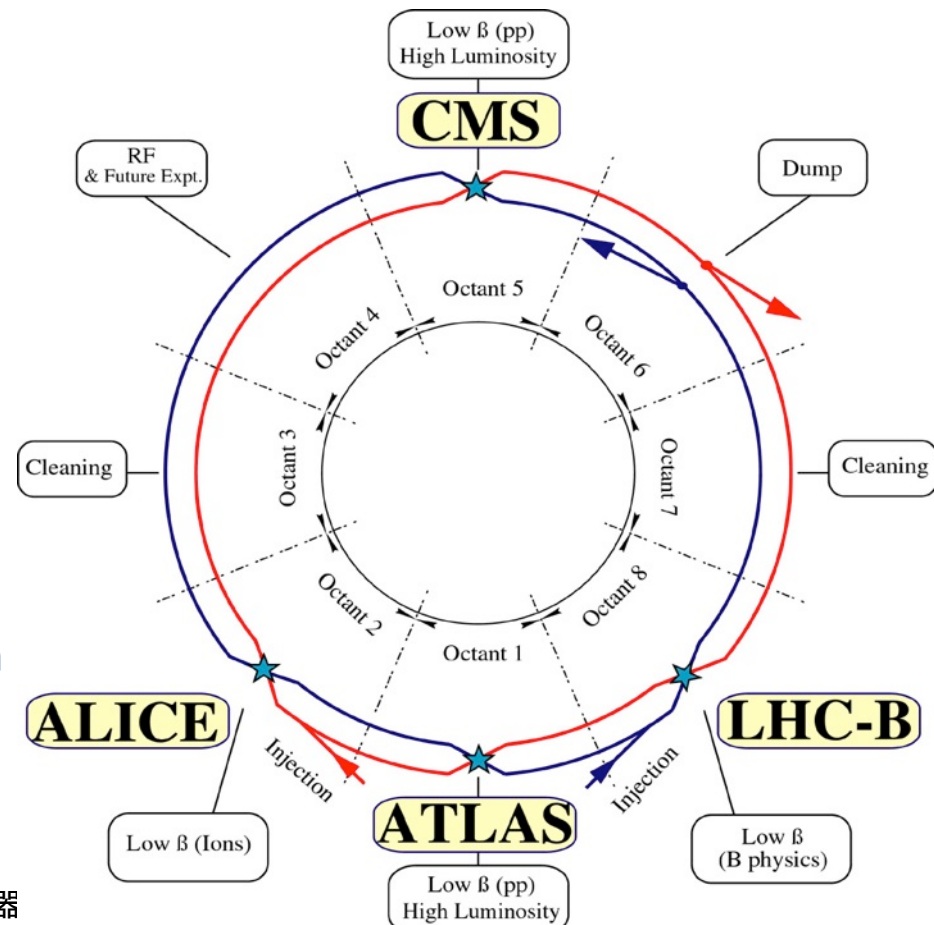
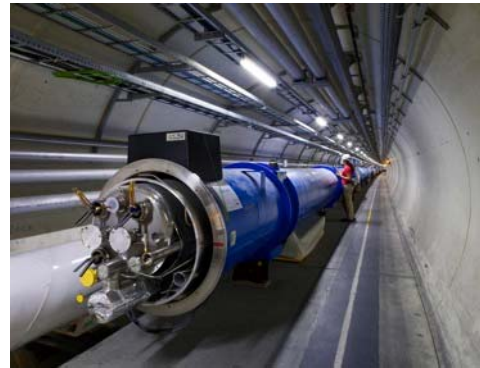
- Large Hadron Collider
- Circumference: 26.7 km
- Proton Beam Injection Energy: 450 GeV
- p + p Collision Energy:
 - 4 + 4 TeV (2012)
 - 7 + 7 TeV (design)

Splice consolidation work in LS1
(2013-2014)

- Nominal Luminosity: $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- Superconducting Technology and Cryogenics
 - 2 in 1 main dipole at 8.3T: 1232 magnets
 - Cooled at 1.9 K by 100 tons of superfluid helium
 - Total weight of cold mass: 35,000 ton
 - Electrical power of 40 MW for cryogenics plant
- Construction budget: > 5000 MCHF

13.7.26

高エネルギー加速器



LHC and Injectors

CERN Proton Accelerator Chain

- LHC : 2x(0.45 – 7) TeV

HL-LHC Upgrade

- SPS : 26 – 450 GeV

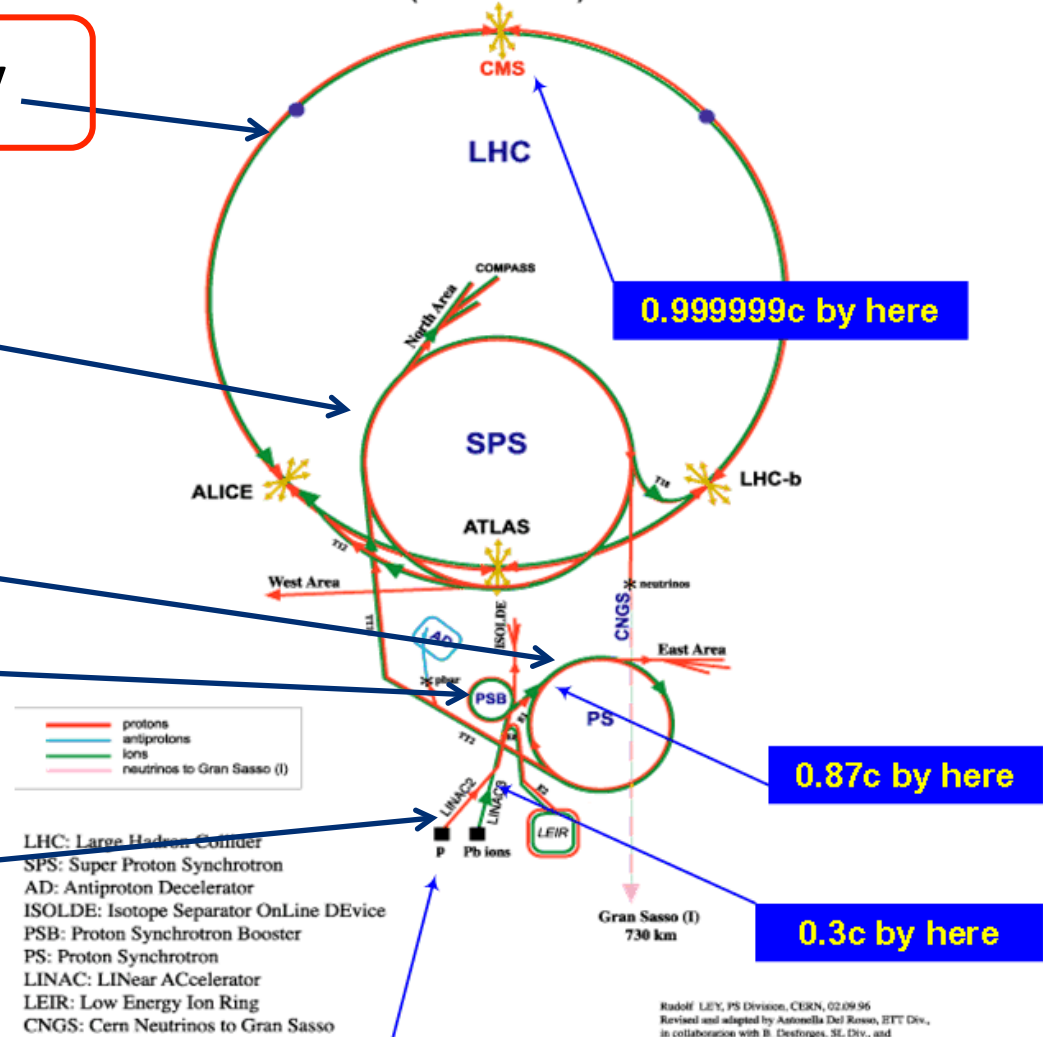
- PS : 1.4 - 26 GeV

- PSB : 0.05 -1.4 GeV

- Linac: 0-50 MeV

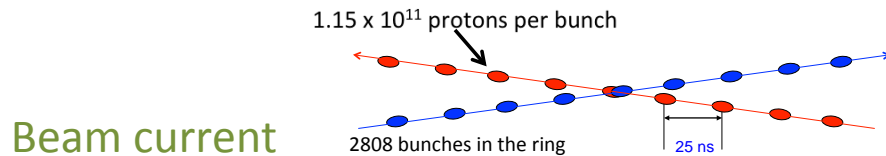
LHC Injectors Upgrade (LIU)

CERN Accelerators
(not to scale)



Rudolf LEIR, PS Division, CERN, 02.09.95
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, BITT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SE Div., and
D. Manglani, PS Div. CERN, 23.05.01

Present LHC Performance

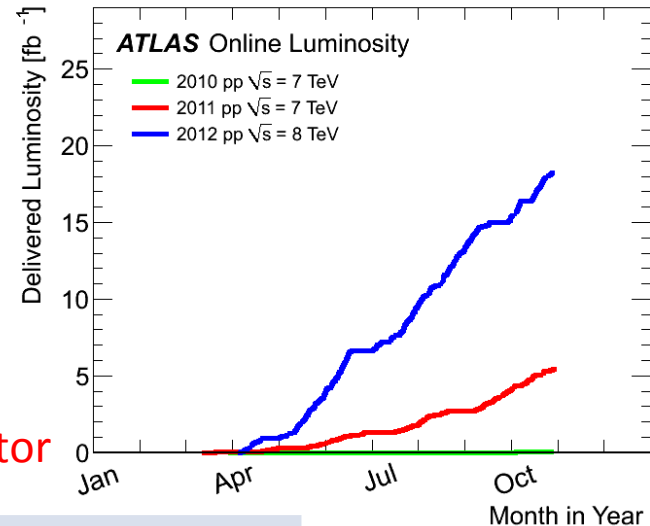


Beam current

$$L = \underbrace{\gamma_r}_{\text{Energy}} \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi \epsilon_n \beta^*} \underbrace{F}_{\text{Beam Size}}$$

$$F = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\theta_c \sigma_z)^2}{4\epsilon_n \beta^*} \gamma_r}$$

Geometric reduction factor



	Best by 2012	Nominal
Energy [TeV]	4.0	7.0
β^* [m] IP 1,5	0.6	0.55
Bunch spacing [ns]	50	25
n_b , Number of bunches	1374 1368 collisions/IP1&5	2808
ϵ_n , Normalized emittance [mm.mrad]	~2.5 start of fill	3.75
N_b , Bunch intensity	1.6 – 1.7e11	1.15e11
Stored energy [MJ]	~140/beam	362/beam
Peak luminosity [cm ⁻² s ⁻¹]	7.73e33	1.0e34

Close to design

Pile up

67% of nominal !!

Double batch from booster

77 % design Lumi., even at 4/7 energy!!

目次

- LHCの概要
- LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)
- KEKからの貢献： 現状と計画
 - 加速器
 - 超伝導磁石
- まとめ

High Luminosity LHC Upgrade (HL-LHC)

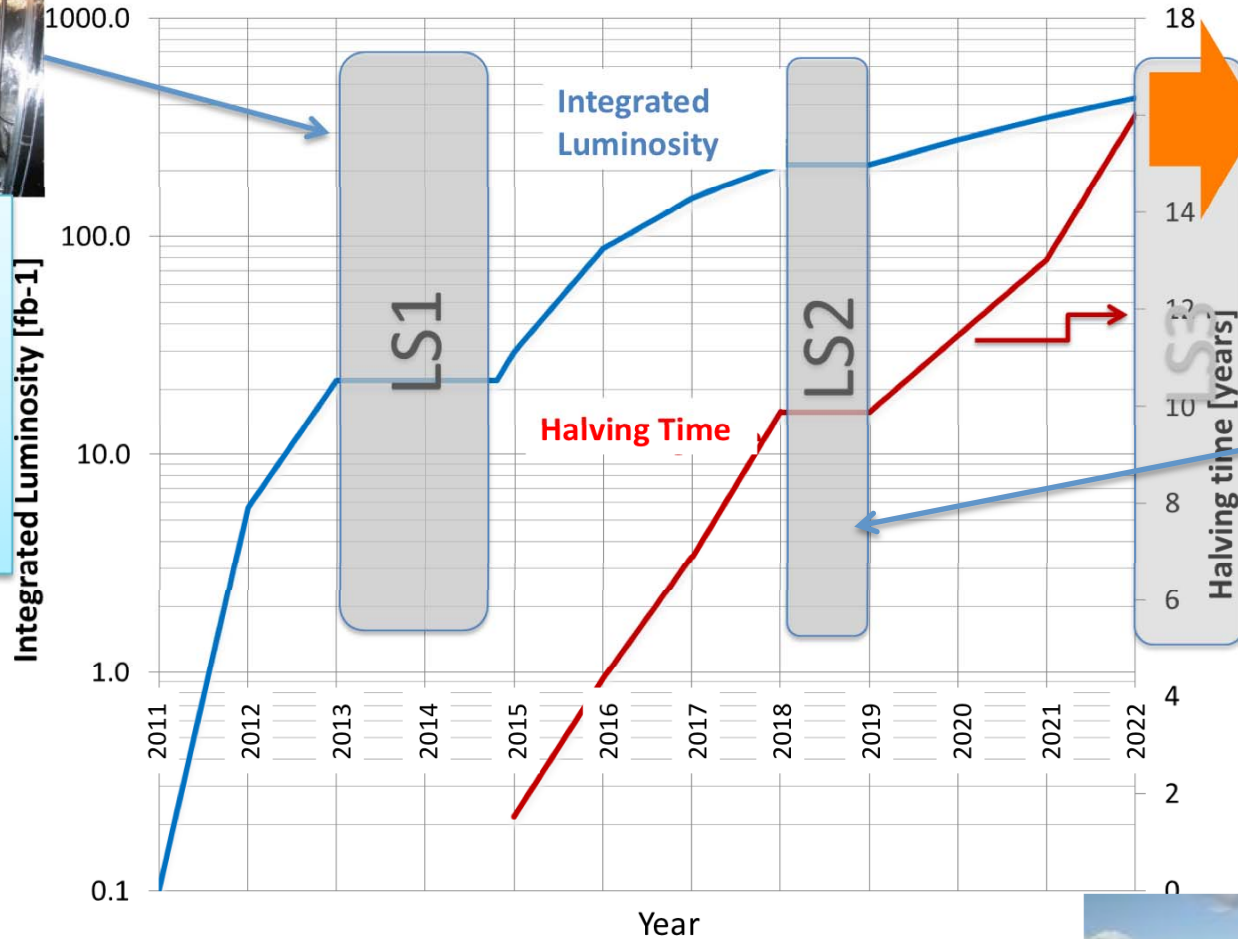
Target: 3000fb^{-1} , $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ (along with LIU)

(Nominal LHC 300fb^{-1} , $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)

2022
Installation
HL-LHC
(plan)



Shut down to fix interconnects and overcome energy limitation (LHC incident of Sept 2008) and R2E



Shut down to overcome beam intensity limitation (Injectors, collimation and more...)



Time evolution of “Integrated Luminosity” & “Halving time of



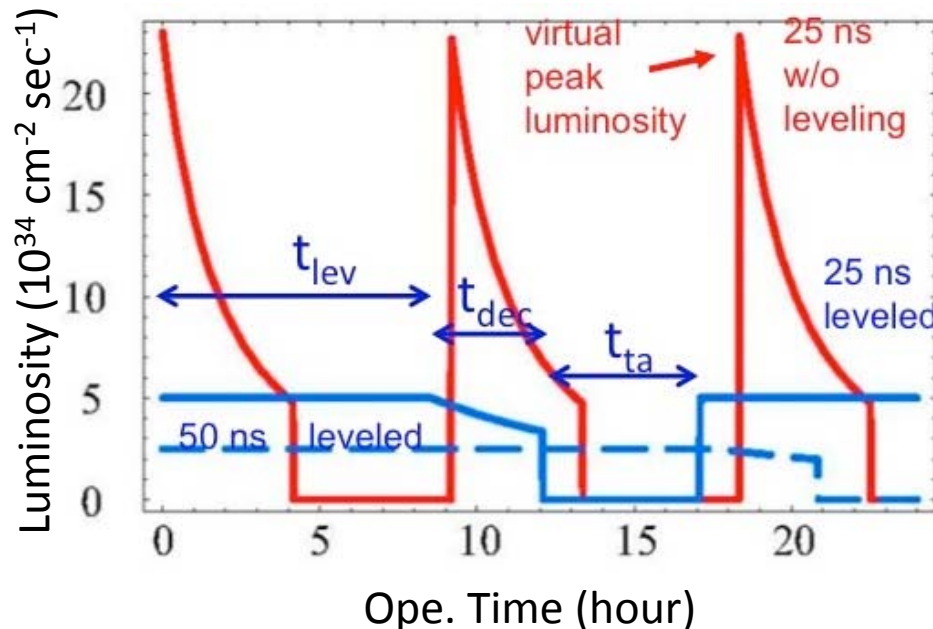
Upgrading Scenario

$$L = \frac{\gamma_r \underbrace{N_b^2 n_b f_{rev}}_{\text{Beam current}}}{4\pi \epsilon_n \beta^*} \underbrace{F}_{\text{Beam Size}}$$

Energy

$$F = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\theta_c \sigma_z)^2}{4\epsilon_n \beta^*} \gamma_r}$$

Geometric reduction factor



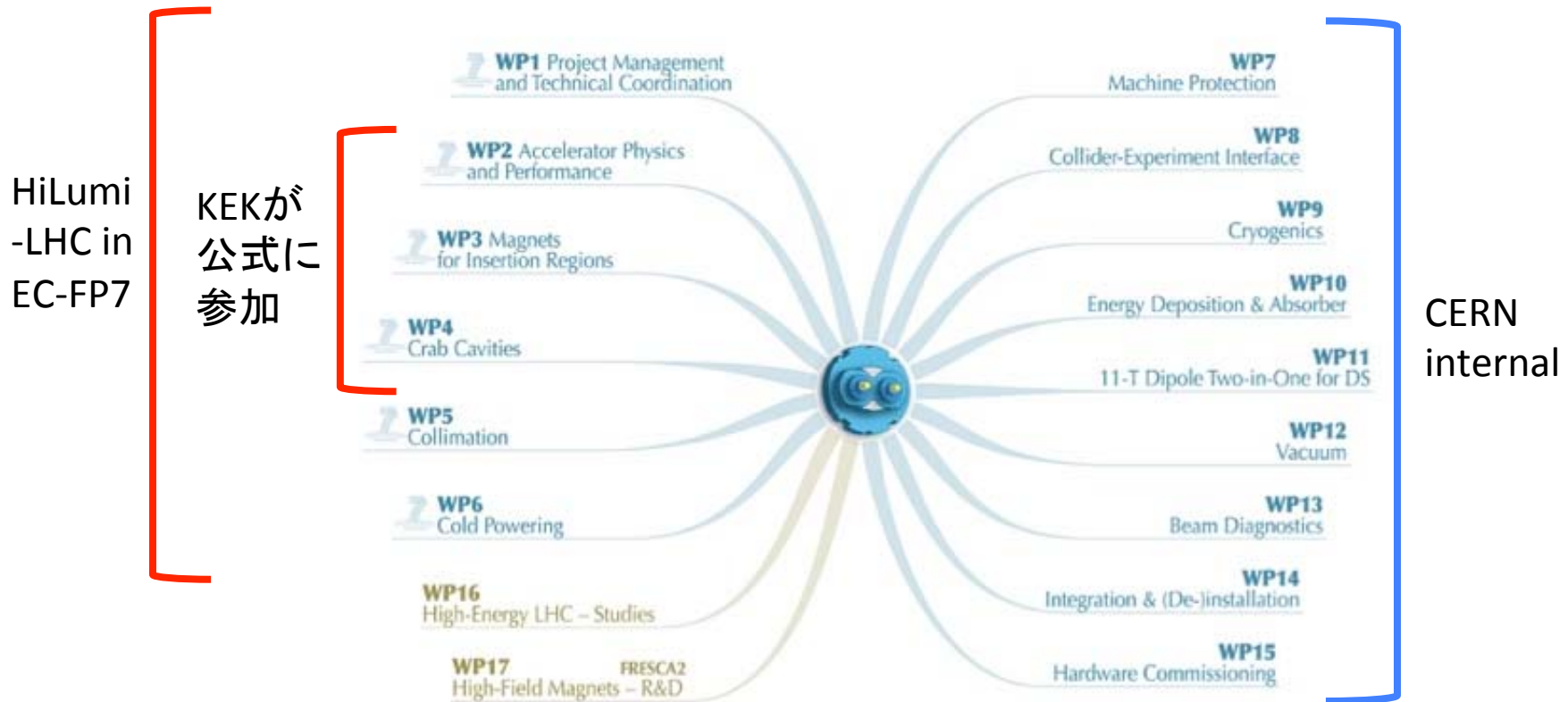
Achieving Higher Luminosity

- Increasing beam current
 - LHC Injectors Upgrade (LIU)
 - * while keeping small emittance...
 - Beam Dynamics
- Small β^*
 - New optics & Layout
 - Achromatic Telescopic Squeeze
 - New crossing angle
 - New IR magnets
 - Large aperture Quads and beam separation dipole
 - strong corrector
- Enhancement of collision efficiency
 - Crab-Cavities for IR
- Suppression of Pile-Up events
 - Levelled by detuning of optics, CC.

HL-LHCプロジェクト: WPの構成

1 project – 1 structure: HL-LHC

FP7 HiLumi Design Study just covers part of it

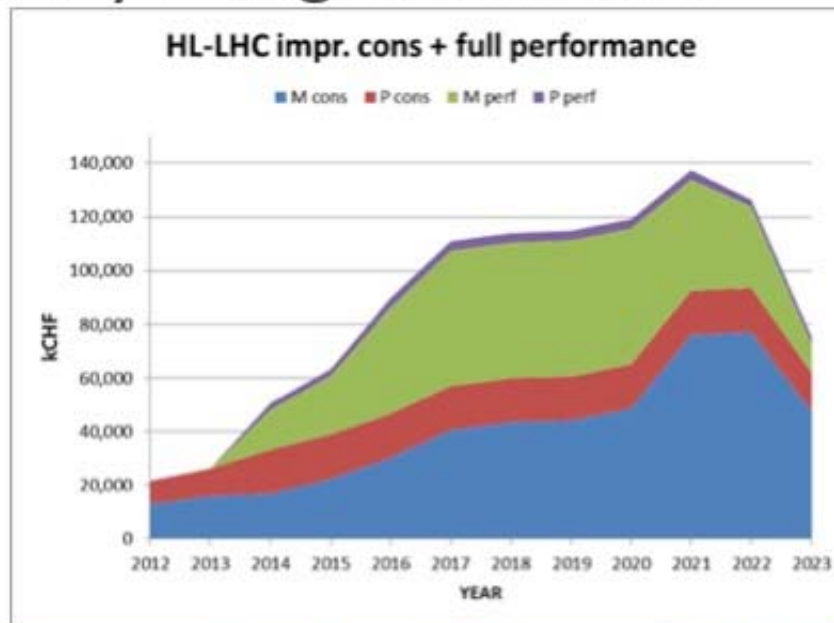


- 2011年から概念設計を開始
- CERN+欧米日での国際協力

※LIU (LHC Injectors Upgrade) 計画は別組織

Budget Estimate (CERN)

Preliminary budget estimate



	Improving Consolidation	Full performance	Total HL-LHC
Mat. (MCHF)	476	360	836
Pers. (MCHF)	182	31	213
Pers. (FTE-y)	910	160	1070
TOT (MCHF)	658	391	1,049

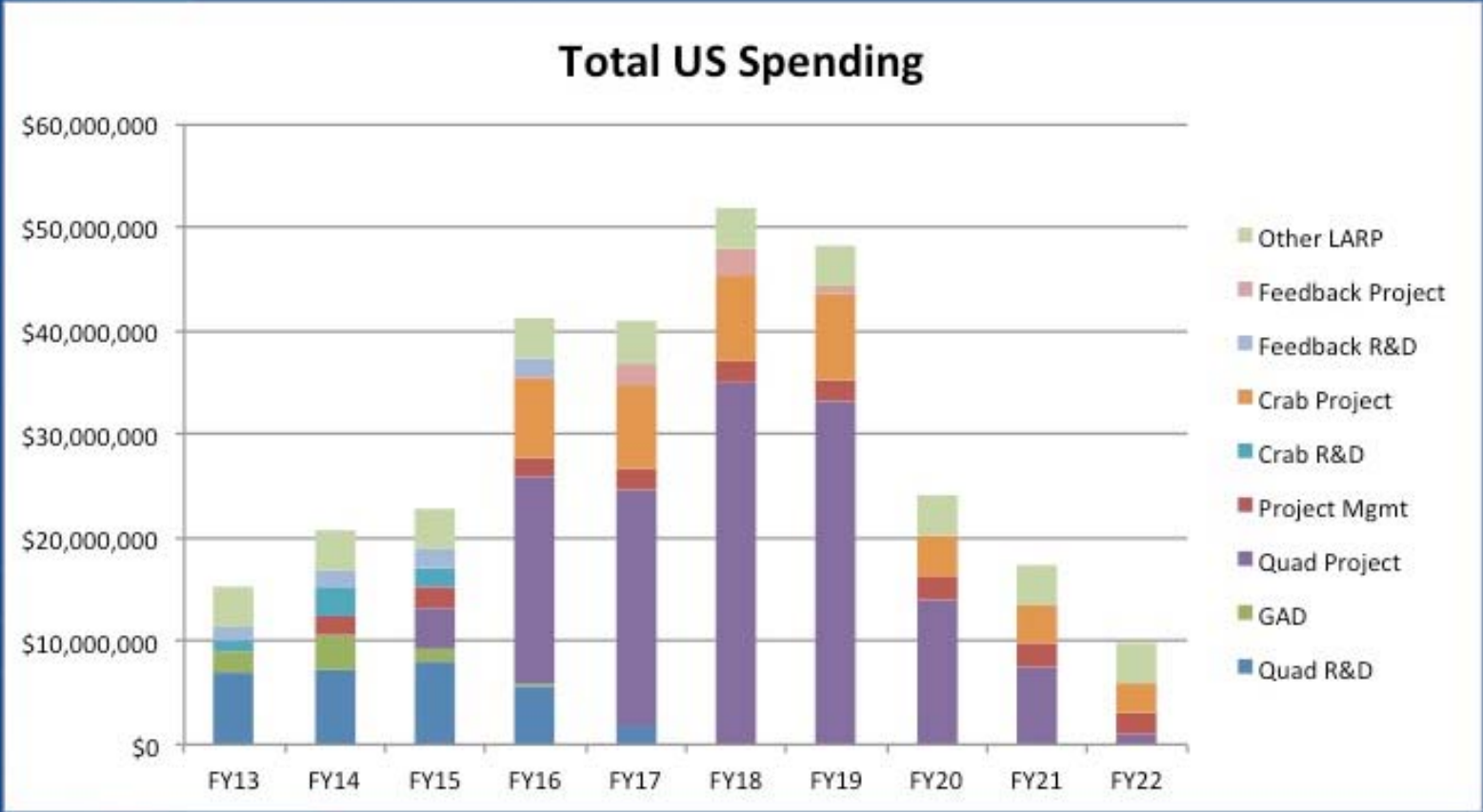
US-LARP: \$200M程度



Contribution of US-LARP



Budget Profile



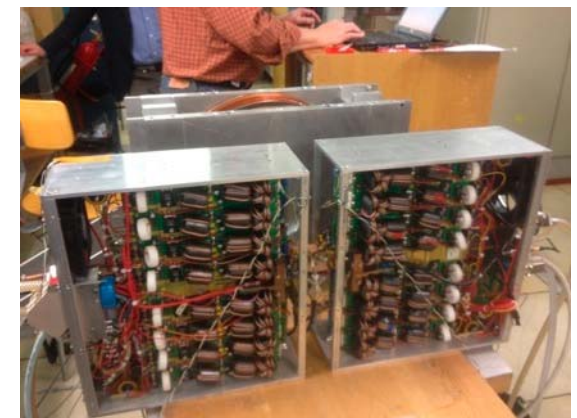
目次

- LHCの概要
- LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)
- **KEKからの貢献： 現状と計画**
 - 加速器
 - 超伝導磁石
- まとめ

LIUへの貢献

加速器: 大森

- PSB空洞のFT3L空洞への置き換え
 - FT3L空洞: 日本で開発した金属磁性体空洞技術(FINEMET)
 - PSBでのビーム試験
 - LS1中にJ-PARCビームを使ってビーム負荷試験
 - CERN流フィードバック+J-PARC流ビームフィードフォワード
 - 空洞を駆動する半導体アンプの放射線試験
 - 半導体(MOSFET)がPSBの放射線に長期に耐えるかをJ-PARCで検証(照射試験)
- LHC/ATLASアップグレードの加速器パートとして半導体アンプの半数(20AMPs X 2)を制作
- PSで起きているLongitudinal Coupled Bunch Instability対策のための広帯域空洞の設置
 - γ トランジションを越えた後エミッタンスが増加
 - **ダンパー空洞**によりInstabilityを抑え込む
- PSBのFT3L空洞、PSのダンパー空洞に共通のLLRF(Low Level RF: RF制御)での技術協力
 - 広帯域空洞での大強度ビームの取り扱い: J-PARC RCSで1E13以上

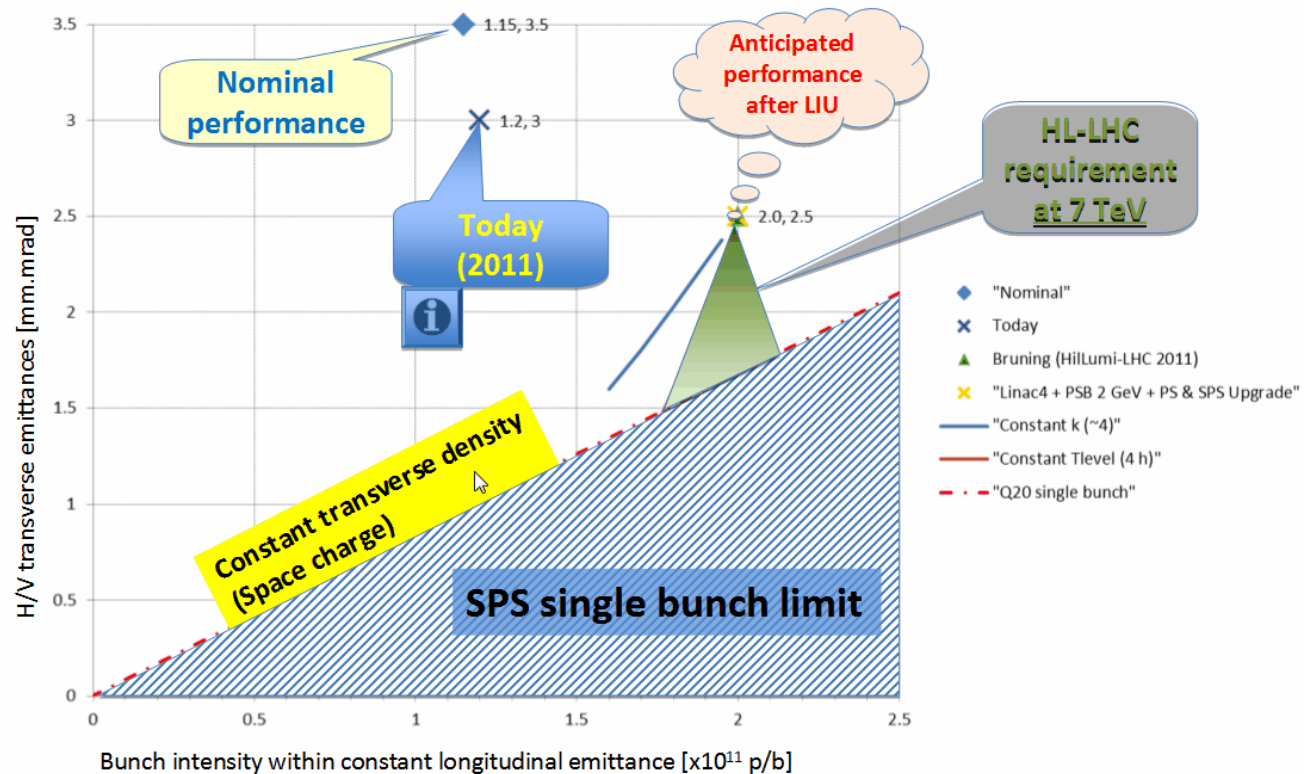


FET耐放射線試験@J-PARC MR

LIUへの貢献

加速器: Molodozhentsev

Beam parameters at LHC injection [25 ns]



- InjectorsのBrightness向上が必要
 - working point optimization
 - space charge effects
 - resonance compensation

|1- 25/11/2011

For LHC injectors it is necessary to improve the computational machine models to reproduce main machine resonances, observed experimentally.



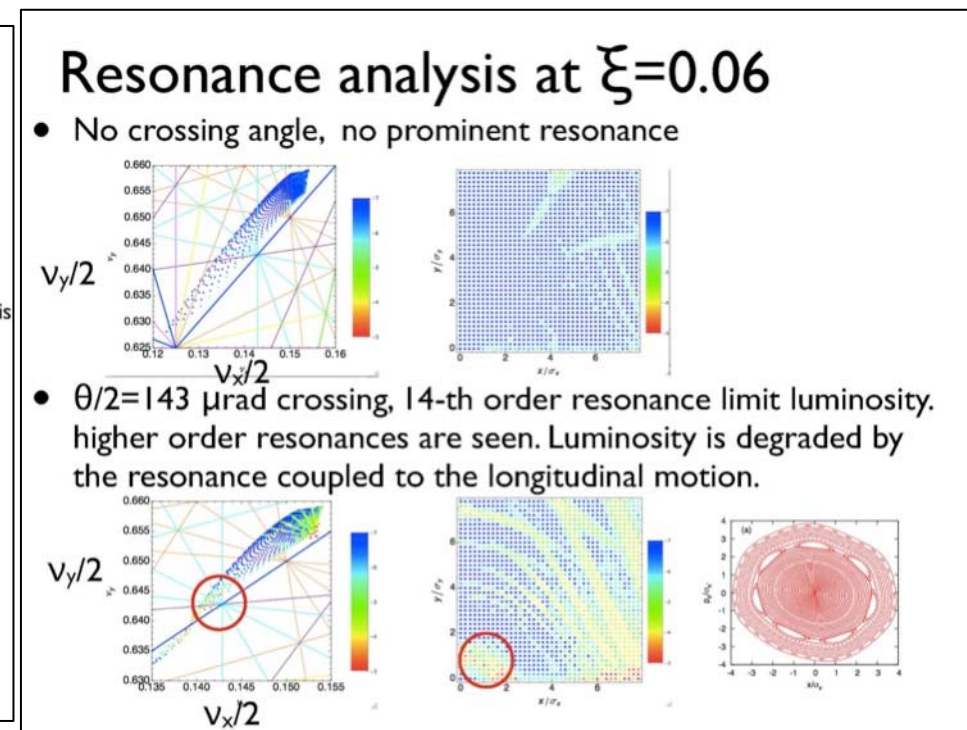
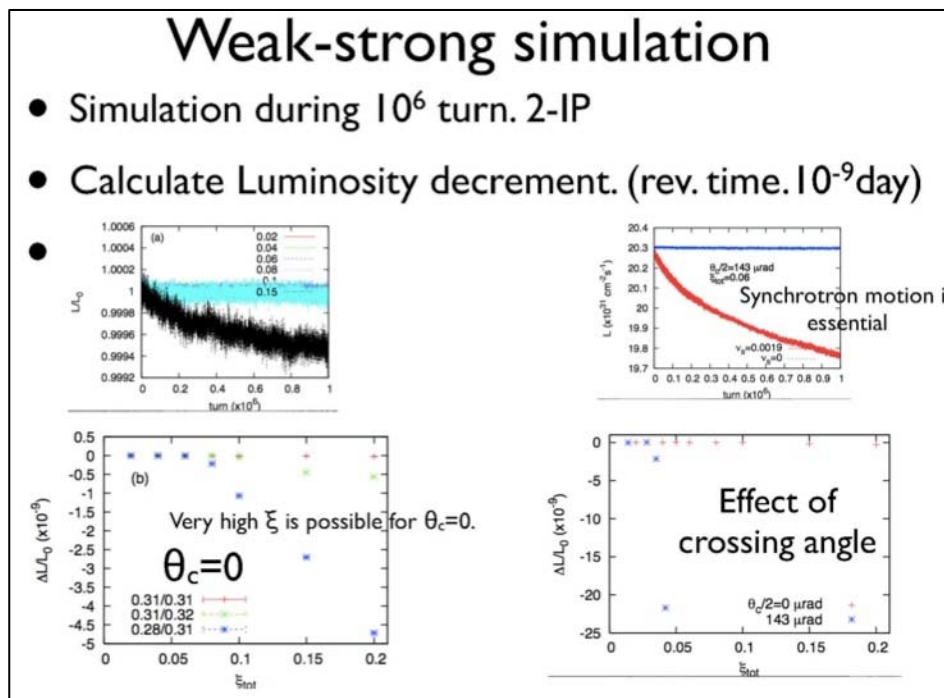
- **PTC-ORBIT combined code (KEK-SNS)の開発** → 特にPSBのシミュレーション
 - Collaboration: KEK, SNS, LANL, CERN

HL-LHCへの貢献: Beam-Beam Limit Study

“How high beam-beam parameter achieved in LHC?”

加速器: 大見

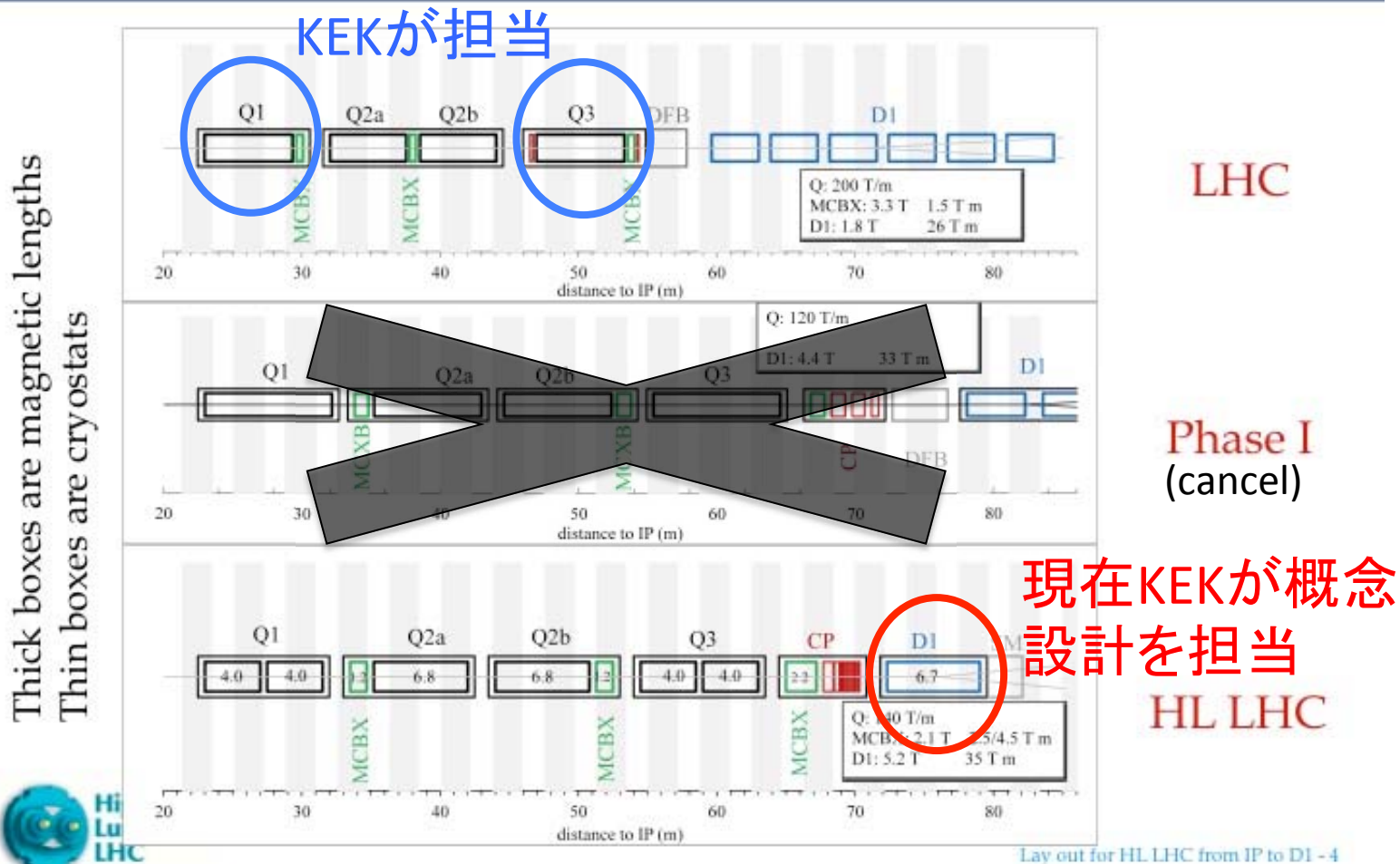
- The design value is 0.0034/IP.
 - Experiments shows >0.03/2IP
- Effect of crossing angle
- Lower beta, large Piwinski angle
- Study parameters: 2IP, $\gamma\epsilon=2\mu\text{m}$, $\beta=0.55\text{m}$, $\sigma_z=7.5\text{cm}$, $v_x=64.31$ $v_y=59.32$, $N_p=1.63\times 10^{11}$ or higher.



目次

- LHCの概要
- LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)
- **KEKからの貢献： 現状と計画**
 - 加速器
 - **超伝導磁石**
- まとめ

IR Magnets, Layout



ATLASとCMSの両側のIRのみ大改造

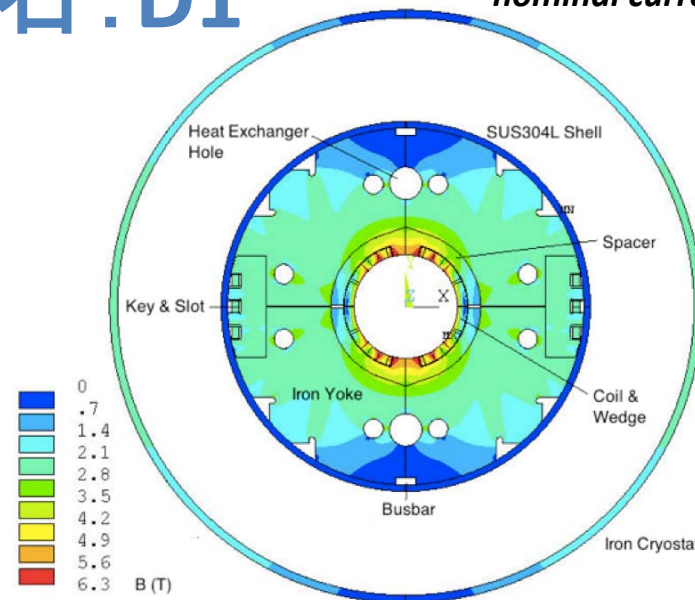
ビーム分離用大口徑双極磁石 : D1

- コイル内径: 150 mm
- 磁場長: 35-40 T m
- 定格磁場: 5.2 T @ 11kA
- ロードライン比: 70-75 % (直線部ピーク磁場5.9T)
- 運転温度: 1.9 K (超流動He冷却)
- 超伝導コイル: 15mm厚1層コイル
 - LHC主双極磁石外層コイル用NbTiケーブル
- 機械構造: 鉄ヨークカラー
 - LHC-MQXA, J-PARCニュートリノSCFMを踏襲
- 磁場精度(目標): $< 10^{-4}$ (参照半径50mm)
- 磁石外径: 570 mm
- 放射線: 数10 MGy, $\sim 10^{22}$ /m², 数10 W/m

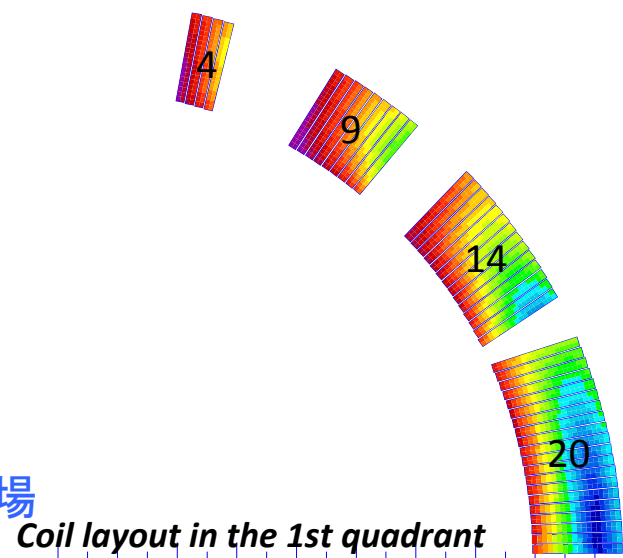
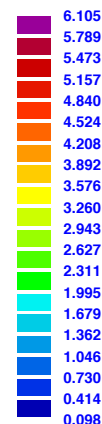
磁石の特徴、設計上の制限

- 大口徑 → 電磁力の積み重ね大。構造設計。
- 外径の制限 → クライオスタットからの磁場寄与、漏れ磁場
- 材料の耐放射線性、磁石の除熱性能が重要

Magnetic field distribution at nominal current



|B| (T)



Coil layout in the 1st quadrant

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90

成果物 & スケジュール (D1磁石関連のみ)

【成果物】

- 概念設計 + 2mモデル磁石を所内開発 (製作、試験)
 - 基本性能を実証

EC-FP7 "HiLumiLHC"
~2015

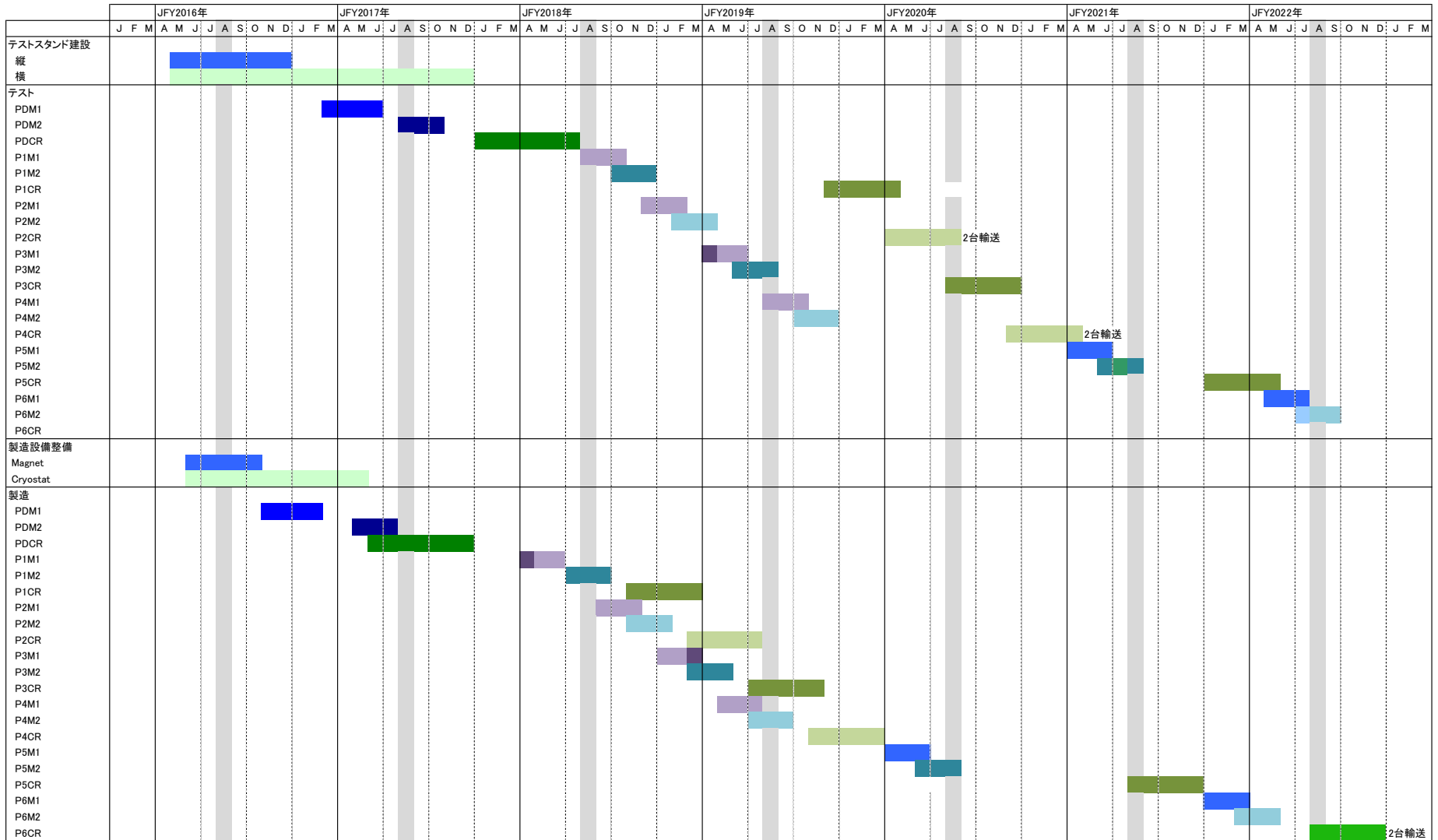
- 実機長プロトタイプ() 及び実機:
 - 1プロトタイプ + 4ユニット + 1スペア → **6ユニット**
 - メーカーで製作
 - 高エネ研で試験評価 @ 第4低温棟
 - 縦型クライオスタットの整備
 - 15kA電源の整備
 - 超流動ヘリウム用真空装置のアップグレード
 - **横型超流動ヘリウム試験装置 (新規)**

HL-LHC Project
2016~2023 (proposal)

【スケジュール】

- 磁石単体を縦型クライオスタットで試験
- クライオスタットを横型試験装置で試験
 - 冷凍機を24時間体制で運転
 - 高圧ガス法令対応
- 2 in 1クライオスタットを想定
 - 磁石2台が共通のクライオスタットに格納

スケジュール(D1磁石関連のみ)



予算(加速器関連)

年度	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	10年積算
(千円)											
LHC収束磁石	126,000	121,600	446,080	386,720	716,960	656,960	357,960	307,640	269,480	18,000	3,407,400
PSB空洞アンプ	6,000	6,000	48,000	48,000	24,000	0	0	0	0	0	132,000
クラブ空洞等(HL-LHC)	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	120,000
加速器小計	144,000	139,600	506,080	446,720	752,960	668,960	369,960	319,640	281,480	30,000	3,659,400

LHCへの貢献:最終収束四極磁石1995~2004



MQXA磁石の所内開発(4台)、量産(2+19台@東芝)、単体試験、Fermilabへの輸送:KEKの所掌



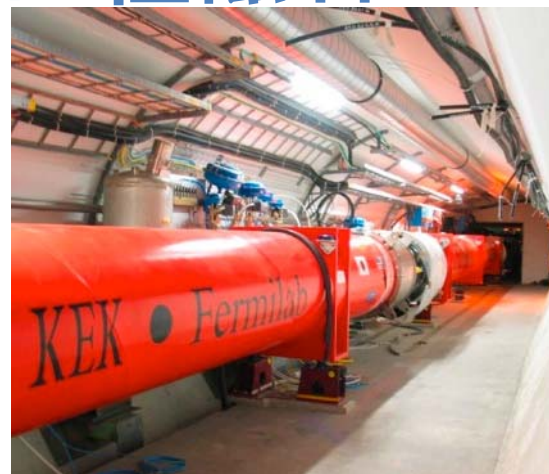
トンネルへの据え付け、アラインメント、冷凍システム: CERN
(Fermilabのサポート)



クライオスタット(真空容器、HeII熱交換器、冷却配管、冷却シールド、ビームパイプ、アラインメント、高圧ガス法令対応、CERNとの調整など): **Fermilab**



LHCへの貢献:最終収束四極磁石1995~2004



トンネルへの据え付け、アラインメント、冷凍システム: CERN
(Fermilabのサポート)

MO...
産...
Ferm...

LHC高輝度化アップグレードでは、KEKがこれら全てのタスクを完遂する必要がある...



クライオスタット(真空容器、HeII熱交換器、冷却配管、冷却シールド、ビームパイプ、アラインメント、高圧ガス法令対応、CERNとの調整など): **Fermilab**

必要人員(D1磁石関連のみ)

- 【参考】 LHC向けMQXA磁石(1996～2004) ※KEKB-QCSも担当
 - 超伝導低温工学センター
 - 新富センター長、山本(P)、土屋(P)、荻津(A)、木村(A)、中本(A)、大畠(E)、飯田(E)、田中(E)、ポスドクx1
 - 加速器研究施設
 - 大内(A)
 - 機械工学センター:モデル磁石所内開発、試験装置開発
 - 寺島(E)、安島(E)、東(E)
- LHC高輝度化アップグレード向けD1磁石&クライオスタット(2013～2023)
 - 超伝導低温工学センター
 - 荻津センター長、中本(P)、徐(A)、田中(E)、高橋(E) +アウトソース
 - 人員増強が絶対的に必要: 木村(AP)、菅野(A)、ポスドクx1、more...
 - 機械工学センター:モデル磁石所内開発、試験装置開発
 - 川又 (E)+アウトソース

目次

- LHCの概要
- LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)
- KEKからの貢献： 現状と計画
 - 加速器
 - 超伝導磁石
- **まとめ**

まとめ

- さらなる高輝度化のためHL-LHCアップグレード(250-300 fb⁻¹/y、3000fb⁻¹)を計画。
 - 2022年『トンネルヘインストール』が目標
 - 大電流化、IR1/5のLow-Beta Insertionの更新、新しいビーム光学(ATS)
 - SC Crab Cavitiesによる衝突の効率化、レベリング
 - 大ビームパワー対策、放射線対策、冷凍能力増強
- WP1-15で設計研究、R&D → 技術設計書を提出(2015) → 建設の判断(2016?)
 - EC-FP7 HiLumi-LHC
 - CERN
 - US-LARP
 - KEK(LIU、ビーム力学、超伝導磁石など)
- 加速器での貢献
 - 2023までに総額36億円強を計画

<http://hilumilhc.web.cern.ch/HiLumiLHC/>