

LHCの現状と 将来のアップグレード計画

高エネルギー加速器研究機構

中本 建志

Reference

- LHC Performance Workshop (Chamonix 2017) <https://indico.cern.ch/event/580313/>
- 129th LHCC Meeting (open session) <https://indico.cern.ch/event/609813/>
- HL-LHC Collaboration Meeting 2016
<https://espace.cern.ch/HiLumi/2016/SitePages/Home.aspx>
- FCC Week 2017 <https://indico.cern.ch/event/556692/>
- EPS-HEP 2017 <https://indico.cern.ch/event/466934/overview>

謝辞

- **KEK** 花垣和則 徳宿克夫 近藤敬比古 山本明
 荻津透 菅野未知央 榎本瞬 鈴木研人
- **CERN** **L. Rossi, E. Todesco, A. Musso**

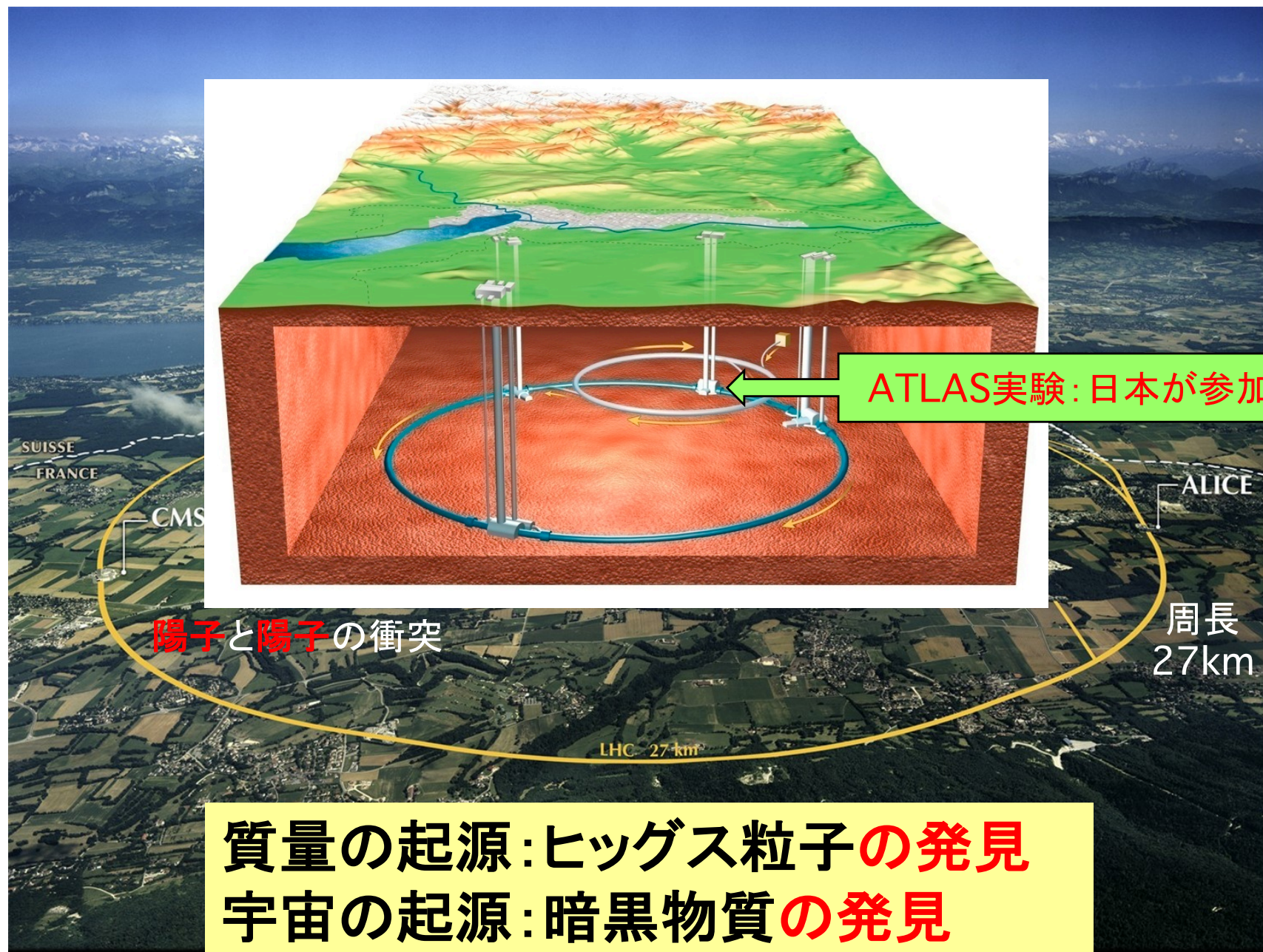
Contents

- **CERN-LHC**
 - **概要、経緯**
 - **日本の貢献**
 - **運転状況**
- **LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)**
 - **概要**
 - **技術開発: 超伝導クラブ空洞、Nb₃Sn四極磁石**
 - **日本の貢献**
- **将来計画: Future Circular Collider (FCC)**
- **まとめ**

CERN-LHC: Large Hadron Collider

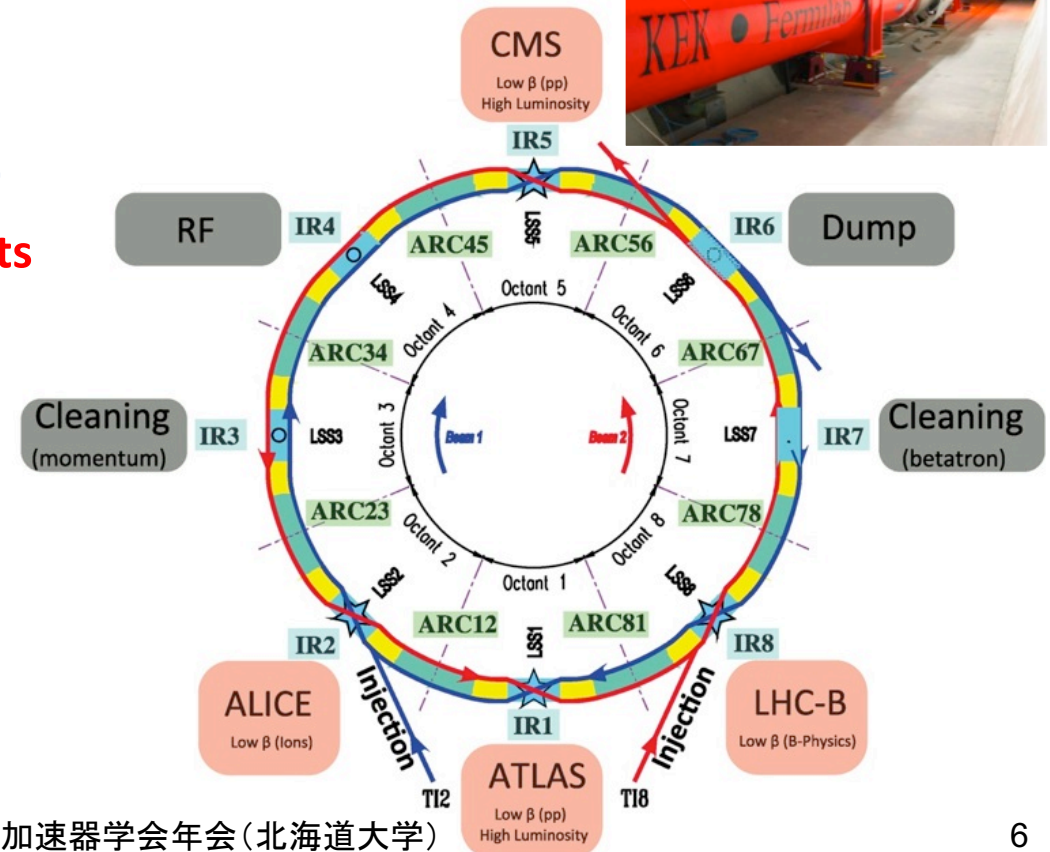


CERN-LHC: Large Hadron Collider



CERN-LHC: Large Hadron Collider

- 周長: 26.7 km
- 入射エネルギー(SPS): 450 GeV
- p + p Collision Energy:
 - 7 + 7 TeV (design)
- **ヘリウム漏洩事故 (2008)**
 - 4 + 4 TeV (2012)
- **磁石間接続、安全対策 in LS1 (2013-2014)**
 - **6.5 + 6.5 TeV (2016)**
- 設計ルミノシティ: $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
- キーテクノロジー: 超伝導磁石、低温技術
 - 2 in 1 main dipole at **8.3T: 1232 magnets**
 - 超流動ヘリウム冷却: 100トン, **1.9 K**
 - 冷却重量: 35,000トン
 - ヘリウム冷凍機プラント: 40MW
- LHC建設費: > 5000 MCHF
- **日本は1995年からLHC建設参加**
 - ビーム衝突点四極磁石
 - ATLAS検出器

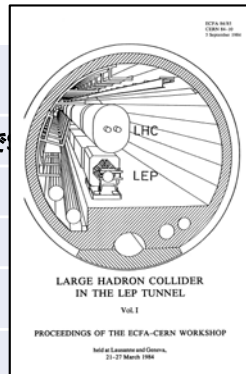


Timelines of LHC, SSC & Tevatron


	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	SSC, p-p, $E_{cm}=40$ TeV	Tevatron (Fermilab), p- p_{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国でSSC計画の検討	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
1984	ローザンヌ会議:LHC計画の基本構想		
1986	ルビア委員会でCERN将来計画としてLHC計画を推薦		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
1988	LEPトンネル完成		
1989	LEP運転開始。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。 陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
1990	アーヘン会議でLHC加速器の基本設計を確立。 陽子-陽子衝突エネルギー14 TeV		
1992	エビアン会議で多くの実験提案		
1993		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。 LHC建設を理事会で承認。		
1995	日本が建設協力(合計138億円)		トップクォークの発見
1996	インド、ロシア、カナダが建設協力。		
1997	ATLAS, CMS実験を理事会が承認。 アメリカの建設協力(加速器に\$200M、測定器に\$331M)		
2000	LEP運転終了		
2001			RunII開始。 陽子-反陽子衝突エネルギー1.96TeV
2002	完成を2007年に延期		
2008	LHC完成。 直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッショニング。 3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		Tevatron運転終了
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		

Timelines of LHC, SSC & Tevatron

	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	40 TeV	Tevatron (Fermilab), p- p_{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国で	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
1984	ローザンヌ会議:LHC計画の基本構想		
1986	ルビア委員会でCERN将来計画としてLHC計画を推薦		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
1988	LEPトンネル完成		
1989	LEP運転開始。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
1990	アーヘン会議でLHC加速器の基本設計を確立。陽子-陽子衝突エネルギー14 TeV		
1992	エビアン会議で多くの実験提案		
1993		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。LHC建設を理事会で承認。		
1995	日本が建設協力(合計138億円)		トップクォークの発見
1996	インド、ロシア、カナダが建設協力。		
1997	ATLAS, CMS実験を理事会が承認。アメリカの建設協力(加速器に\$200M、測定器に\$331M)		
2000	LEP運転終了		
2001			RunII開始。陽子-反陽子衝突エネルギー1.96TeV
2002	完成を2007年に延期		
2008	LHC完成。直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッショニング。3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		Tevatron運転終了
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		



Timelines of LHC, SSC & Tevatron

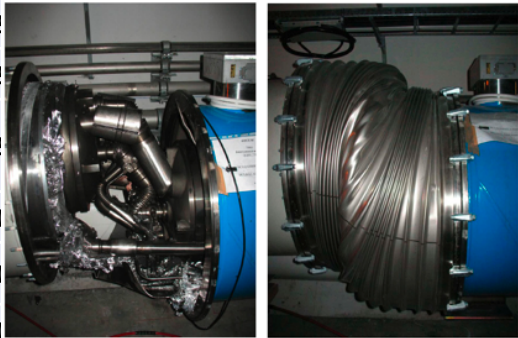
	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	SSC, p-p, $E_{cm}=40$ TeV	Tevatron (Fermilab), p- p_{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国でSSC計画の検討	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
1984	ローザンヌ会議:LHC計画の基本構想		
1986	ルビア委員会でCERN将来計画としてLHC計画を推薦		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
1988	LEPトンネル完成		
1989	LEP運転開始。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
1990	アーヘン会議でLHC加速器の基本設計を確立。陽子-陽子衝突エネルギー14 TeV		
1992	エビアン会議で多くの実験提案		
1993		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。 LHC建設を理事会で承認。		
1995	日本が建設協力(合計138億円)		トップクォークの発見
1996	インド、ロシア、カナダが建設協力。		
1997	ATLAS, CMS実験を理事会が承認。 アメリカの建設協力(加速器に\$200M、測定器に\$331M)		
2000	LEP運転終了		
2001			RunII開始。 陽子-反陽子衝突エネルギー1.96TeV
2002	完成を2007年に延期		
2008	LHC完成。 直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッショニング。 3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		

Timelines of LHC, SSC & Tevatron



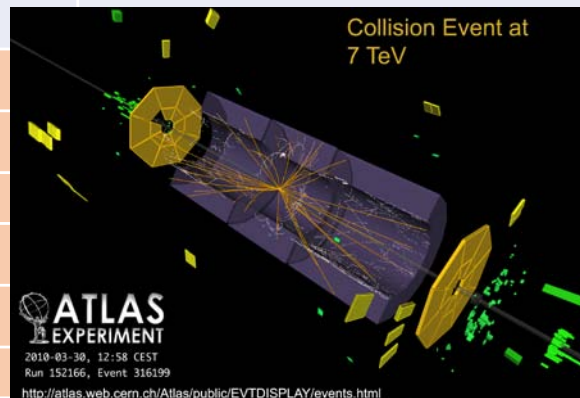
	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	SSC, p-p, $E_{cm}=40$ TeV	Tevatron (Fermilab), p- p_{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国でSSC計画の検討	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
	LHC計画を推		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
	を確立。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。 陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。 LHC建設を理事会で承認。		
1995	日本が建設協力(合計138億円)		トップクオークの発見
1996	インド、ロシア、カナダが建設協力。		
1997	ATLAS, CMS実験を理事会が承認。 アメリカの建設協力(加速器に\$200M、測定器に\$331M)		
2000	LEP運転終了		
2001			RunII開始。 陽子-反陽子衝突エネルギー1.96TeV
2002	完成を2007年に延期		
2008	LHC完成。 直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッショニング。 3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		Tevatron運転終了
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		

Timelines of LHC, SSC & Tevatron

	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	SSC, p-p, $E_{cm}=40$ TeV	Tevatron (Fermilab), p-p _{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国でSSC計画の検討	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
1984	ローザンヌ会議:LHC計画の基本構想		
1986	ルビア委員会でCERN将来計画としてLHC計画を推薦		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
1988	LEPトンネル完成		
1989	LEP運転開始。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
1990	アーヘン会議でLHC加速器の基本設計を確立。陽子-陽子衝突エネルギー14 TeV		
1992	エビアン会議で多くの実験提案		
1993		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。 LHC建設を理事会で承認。		
1995			トップクォークの発見
1996			
1997			
1998			
2000			
2001			
2002			RunII開始。 陽子-反陽子衝突エネルギー1.96TeV
2003			
2008	LHC完成。 直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッションング。 3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		Tevatron運転終了
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		

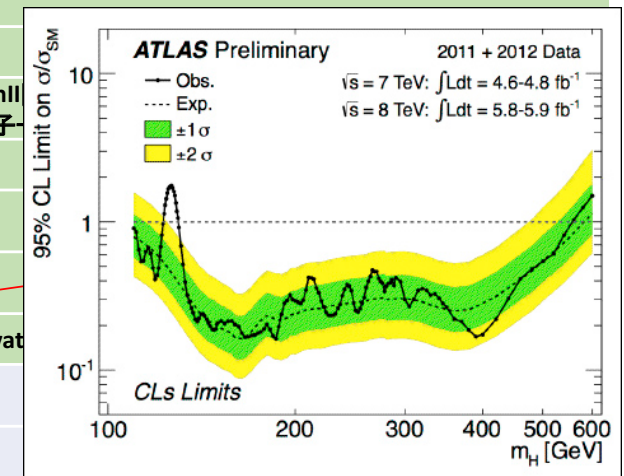
Timelines of LHC, SSC & Tevatron

	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	SSC, p-p, $E_{cm}=40$ TeV	Tevatron (Fermilab), p- p_{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国でSSC計画の検討	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
1984	ローザンヌ会議:LHC計画の基本構想		
1986	ルビア委員会でCERN将来計画としてLHC計画を推薦		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
1988	LEPトンネル完成		
1989	LEP運転開始。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
1990	アーヘン会議でLHC加速器の基本設計を確立。陽子-陽子衝突エネルギー14 TeV		
1992	エビアン会議で多くの実験提案		
1993		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。 LHC建設を理事会で承認。		
1995	日本が建設協力(合計138億円)		トップクォークの発見
1996	インド、ロシア、カナダが建設協力。		
1997	ATLAS, CMS実験を理事会が承認。 アメリカの建設協力(加速器に\$200M、測定器に\$331M)		
2000	LEP運転終了		
2001			RunII開始。 陽子-反陽子衝突エネルギー1.96TeV
2002	完成を2007年に延期		
2008	LHC完成。 直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッショニング。 3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		Tevatron運転終了
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		

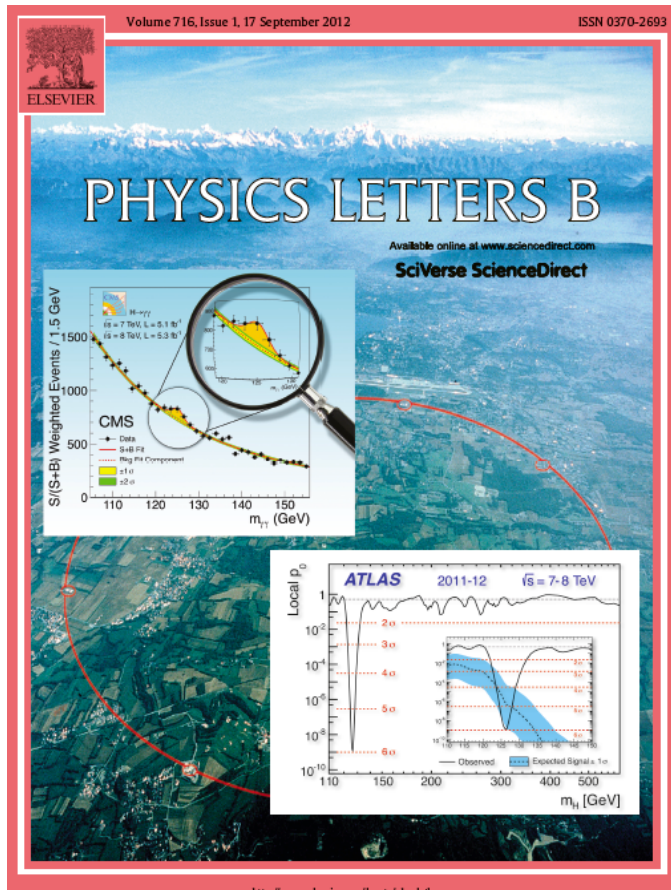


Timelines of LHC, SSC & Tevatron

	LHC (CERN), p-p, $E_{cm}=14$ TeV	SSC, p-p, $E_{cm}=40$ TeV	Tevatron (Fermilab), p-p _{bar} , $E_{cm}=2$ TeV
1982		米国でSSC計画の検討	
1983			Tevatron完成 0.8TeV
1984	ローザンヌ会議:LHC計画の基本構想		
1986	ルビア委員会でCERN将来計画としてLHC計画を推薦		陽子-反陽子衝突エネルギー1.6TeV
1988	LEPトンネル完成		
1989	LEP運転開始。	SSCの建設を開始(テキサス、ダラス近郊)。陽子-陽子衝突エネルギー40 TeV。	
1990	アーヘン会議でLHC加速器の基本設計を確立。陽子-陽子衝突エネルギー14 TeV		
1992	エビアン会議で多くの実験提案		
1993		SSC中止 → 研究者がLHCへ合流	
1994	10m長プロトタイプ磁石が8.73 Tに到達。 LHC建設を理事会で承認。		
1995	日本が建設協力(合計138億円)		トップクォークの発見
1996	インド、ロシア、カナダが建設協力。		
1997	ATLAS, CMS実験を理事会が承認。 アメリカの建設協力(加速器に\$200M、測定器に\$331M)		
2000	LEP運転終了		
2001			RunII 陽子
2002	完成を2007年に延期		
2008	LHC完成。 直後にヘリウム漏洩事故。		
2010	修復後、ビームコミッショニング。 3.5TeV+3.5TeV衝突に成功		
2011	LHC Run1 @ 7TeV		Tevat
2012	LHC Run1 @ 8TeV ヒッグス粒子の発見		
2013	LS1 → 超伝導バス接続部の修復 ノーベル物理学賞F. Englert and P. W. Higgs		
2015	LHC Run2 @ 13TeV		

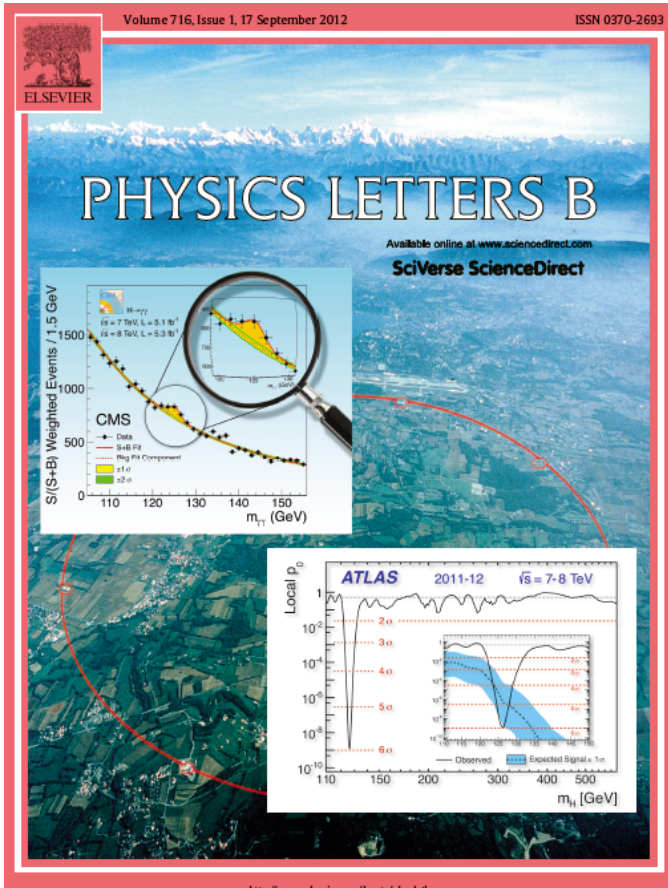


これまでの成果



- 2012年7月4日『質量126GeV付近でのヒッグス粒子の兆候』

これまでの成果



The Nobel Prize in Physics 2013
François Englert, Peter Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013

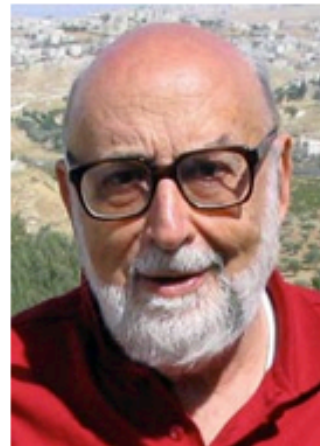


Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

François Englert



Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

LHC and Injectors

CERN Proton Accelerator Chain

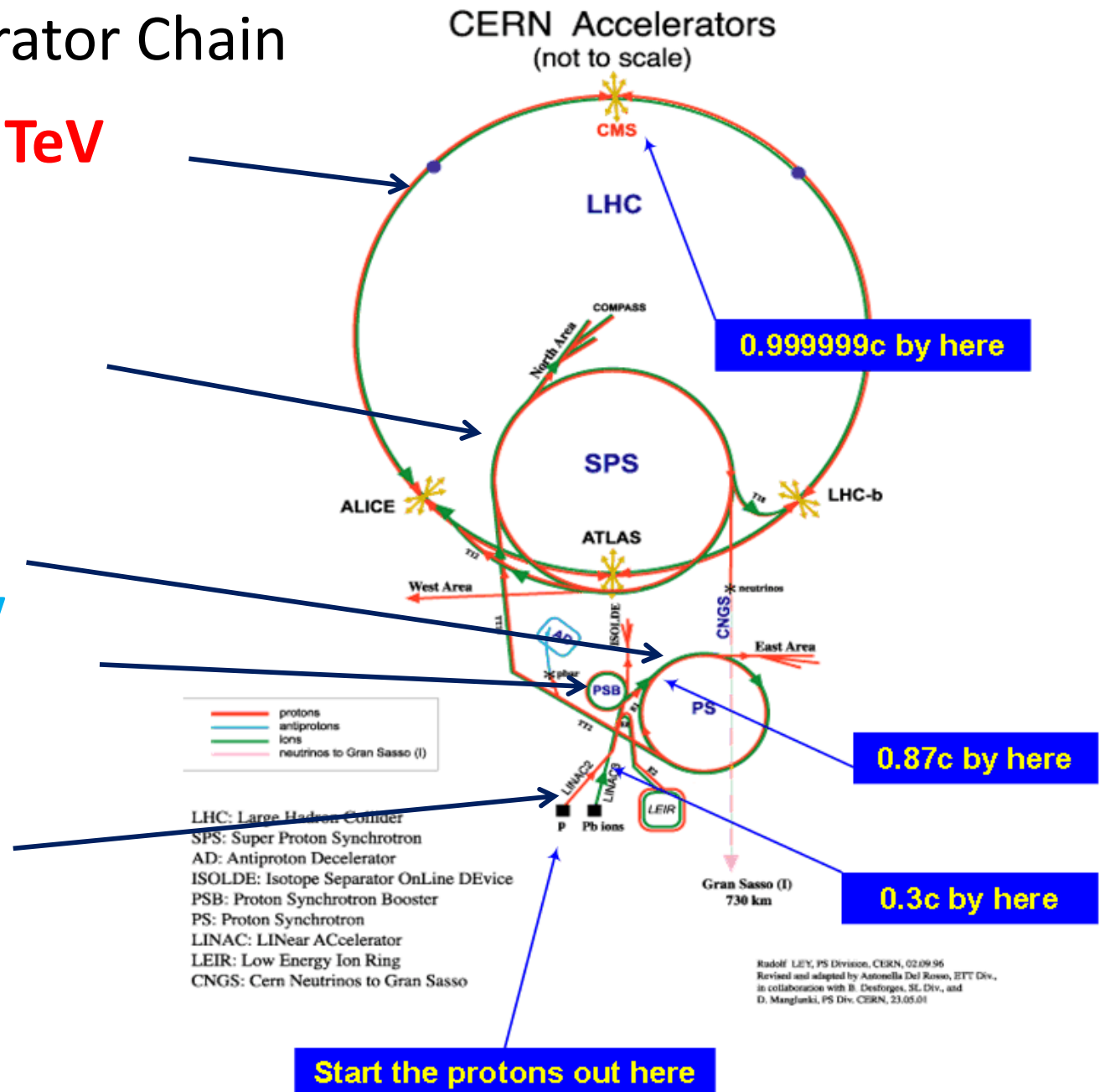
- LHC : 2 x (0.45 – 7) TeV

- SPS : 26 – 450 GeV

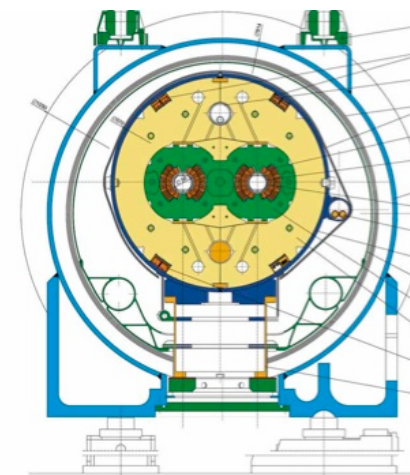
- PS : 1.4 - 26 GeV

- PSB : 0.05 -1.4 GeV

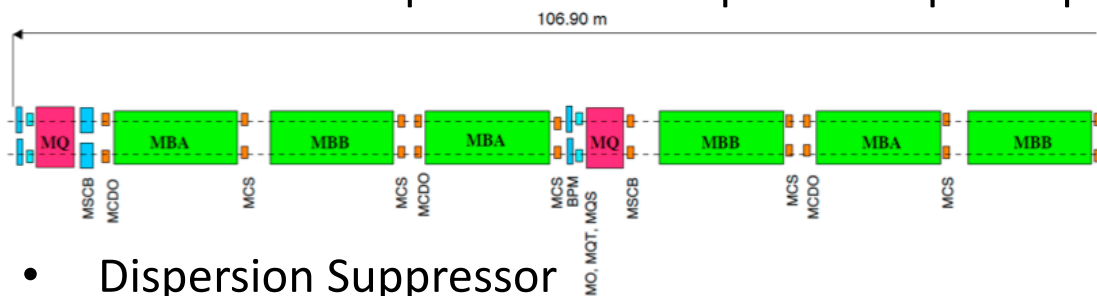
- Linac2 : 0-50 MeV



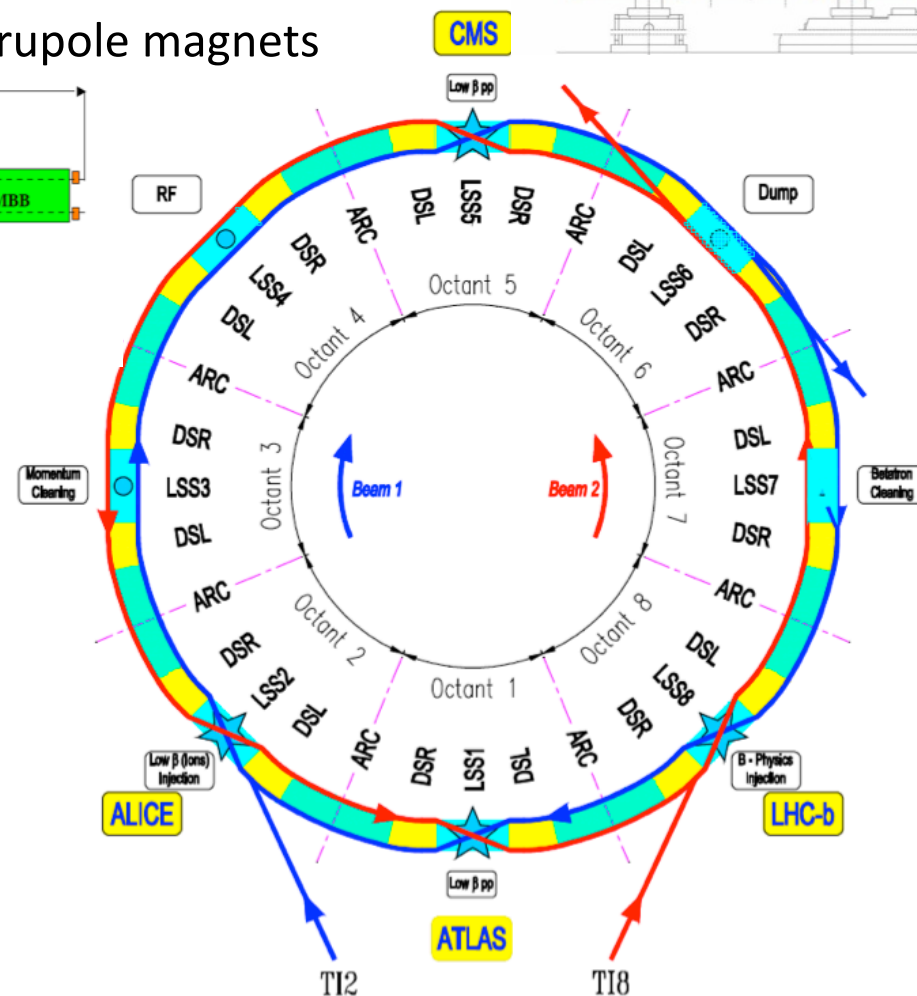
LHC: アーク部と直線挿入部 (衝突点)



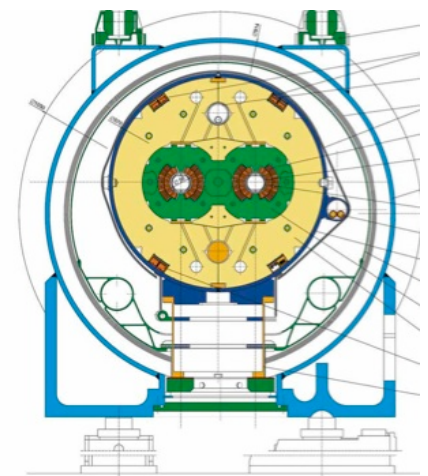
- 8 Arcs
 - 23 * a single cell: a FODO lattice (90° phase advance)
 - A single cell includes: 6 dipoles + 2 quads.
 - Two beams separated by 194 mm.
 - Concept of “2 in 1” dipole and quadrupole magnets



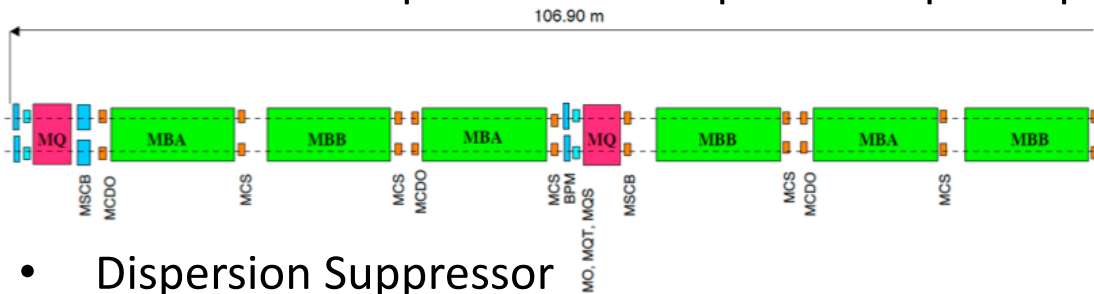
- Dispersion Suppressor
- 8 LSS (~530 m)
 - 4 experimental insertions
 - 1 for beam accelerations (RF)
 - 2 for beam collimation
 - 1 for beam dump



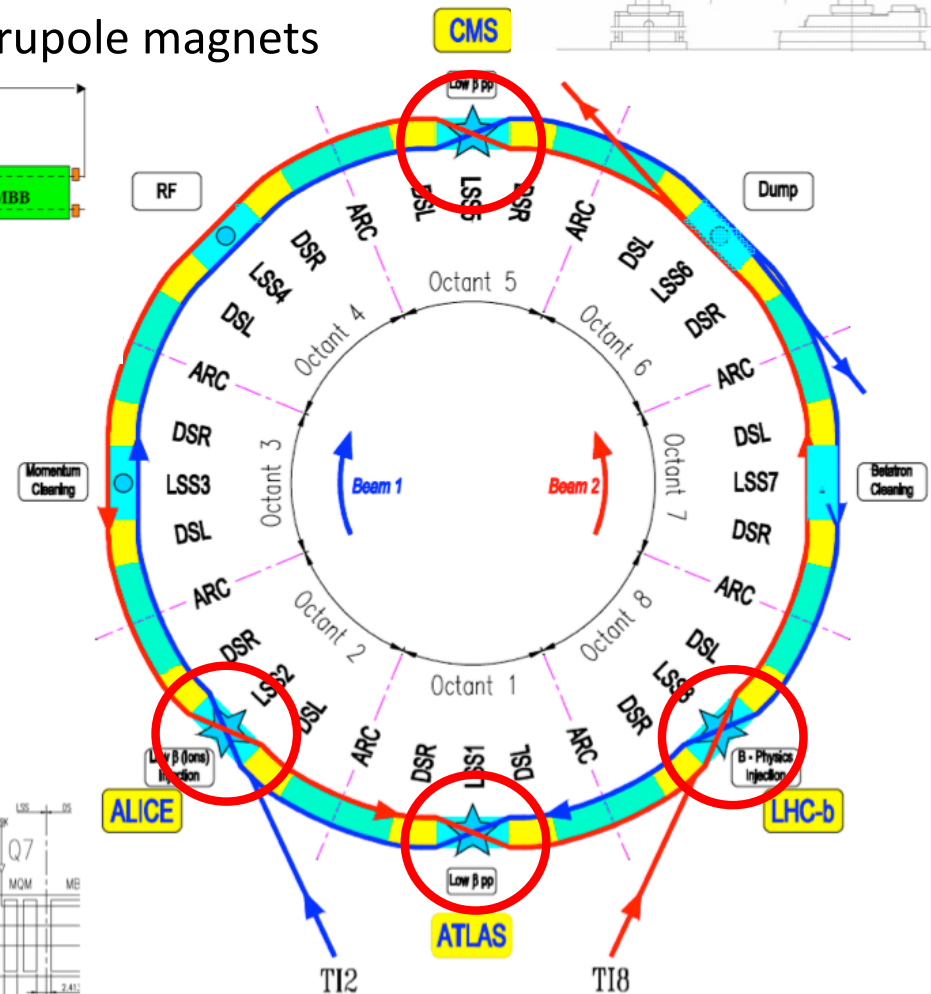
LHC: アーク部と直線挿入部(衝突点)



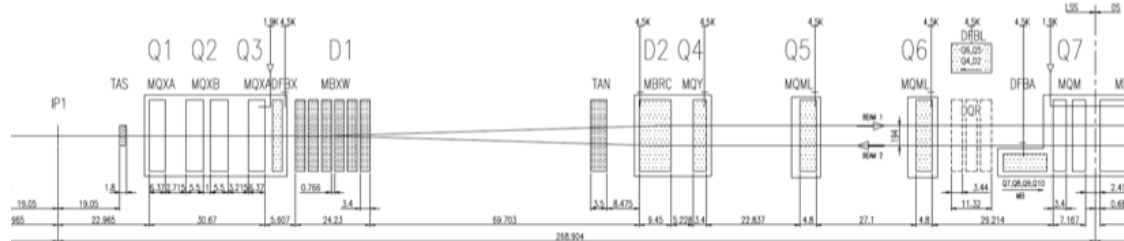
- 8 Arcs
 - 23 * a single cell: a FODO lattice (90° phase advance)
 - A single cell includes: 6 dipoles + 2 quads.
 - Two beams separated by 194 mm.
 - Concept of “2 in 1” dipole and quadrupole magnets



- Dispersion Suppressor
- 8 LSS (~530 m)
 - 4 experimental insertions
 - 1 for beam accelerations (RF)
 - 2 for beam collimation
 - 1 for beam dump



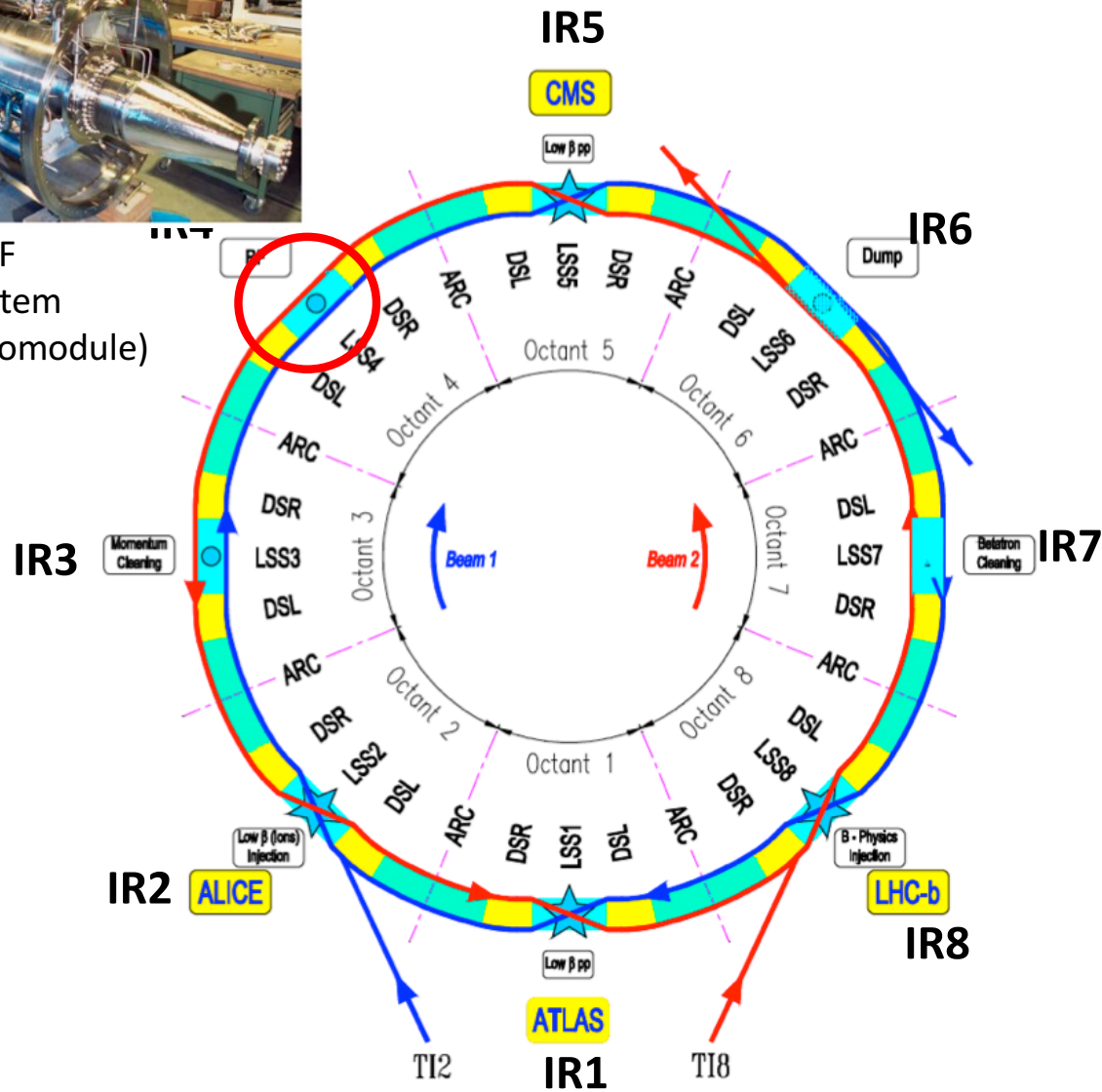
ATLAS



LHC: 衝突点以外の挿入部



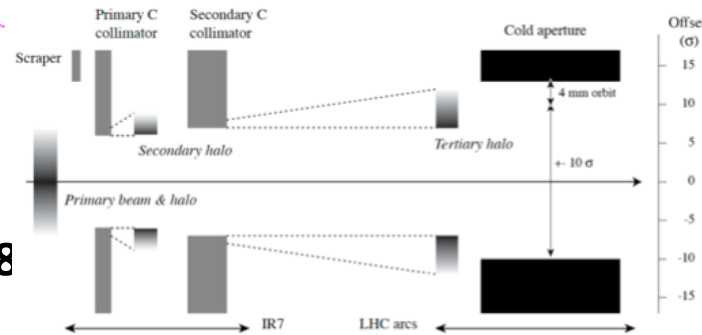
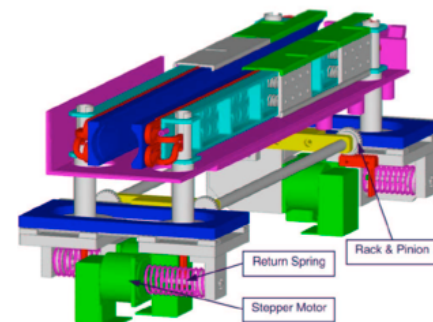
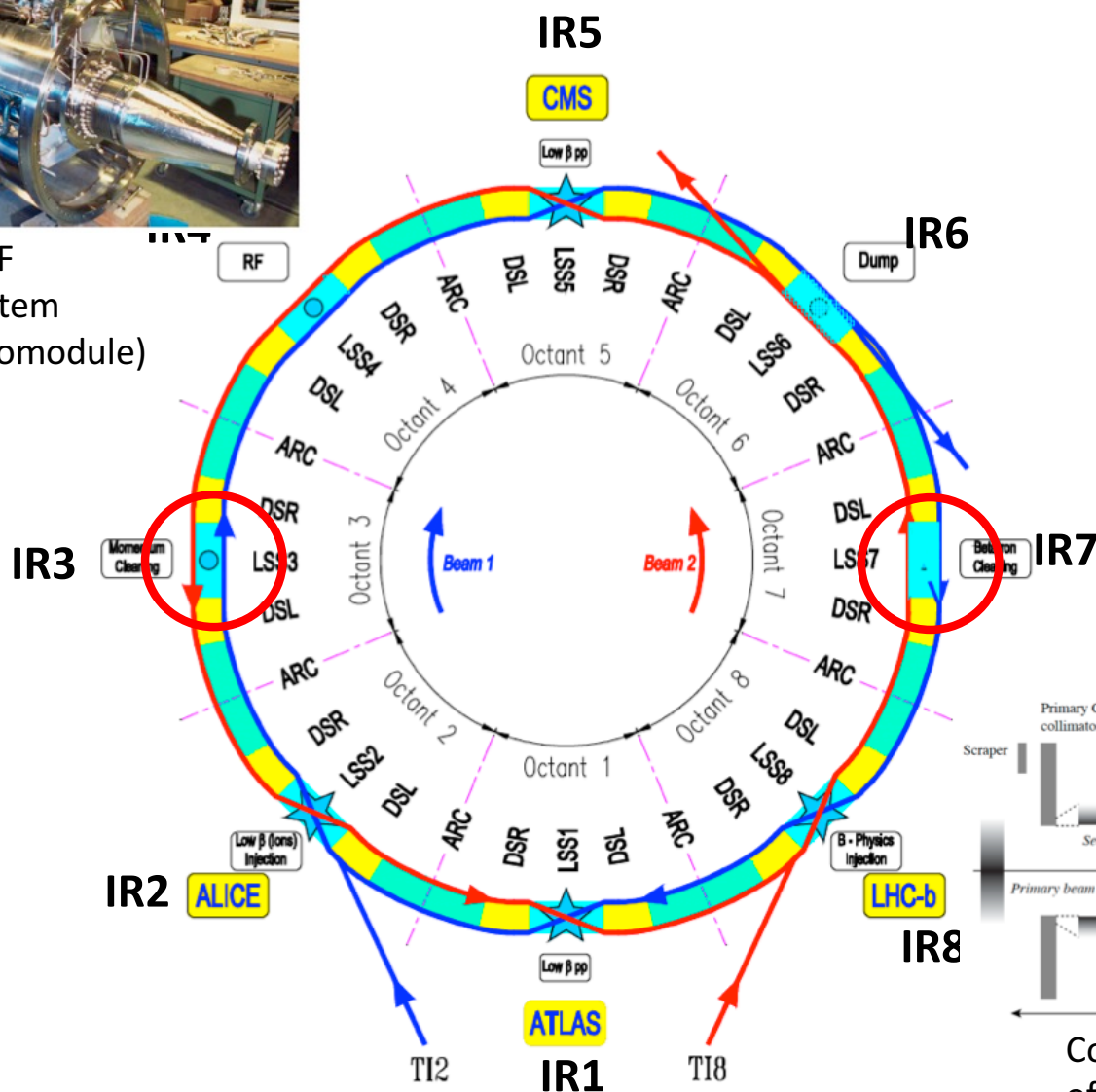
Main 400MHz RF
Accelerating System
(Four-Cavity Cryomodule)



LHC: 衝突点以外の挿入部



Main 400MHz RF Accelerating System
(Four-Cavity Cryomodule)

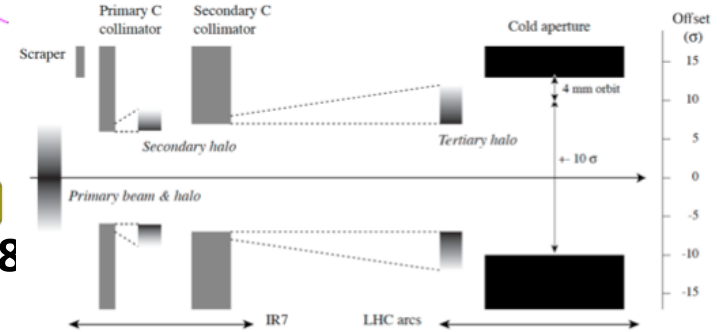
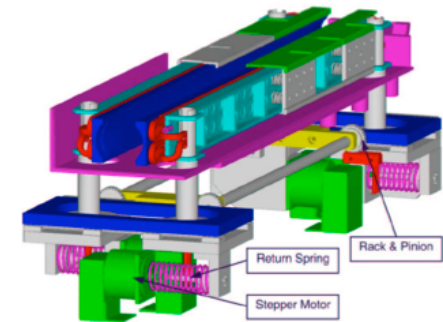
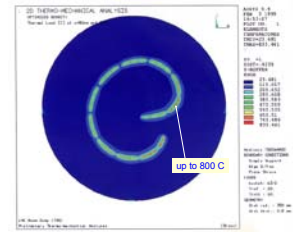
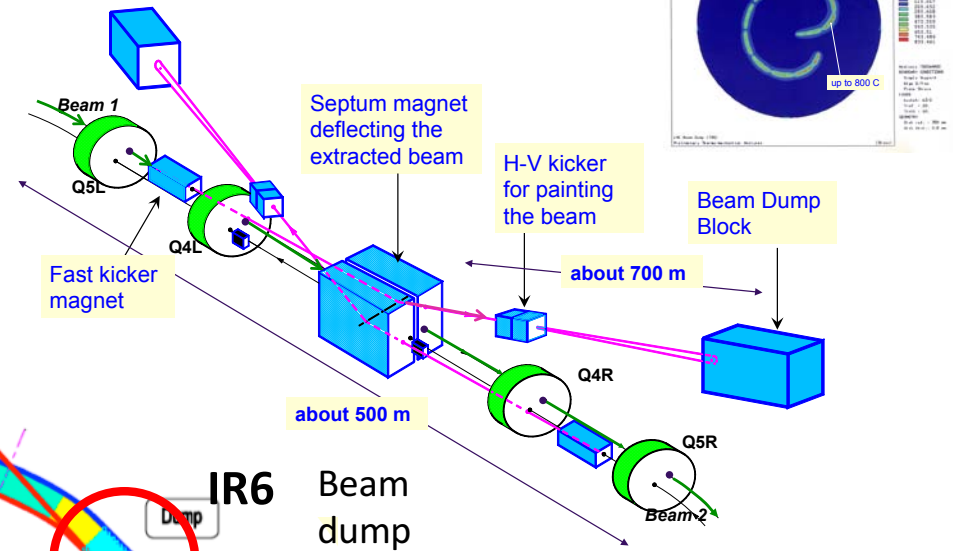
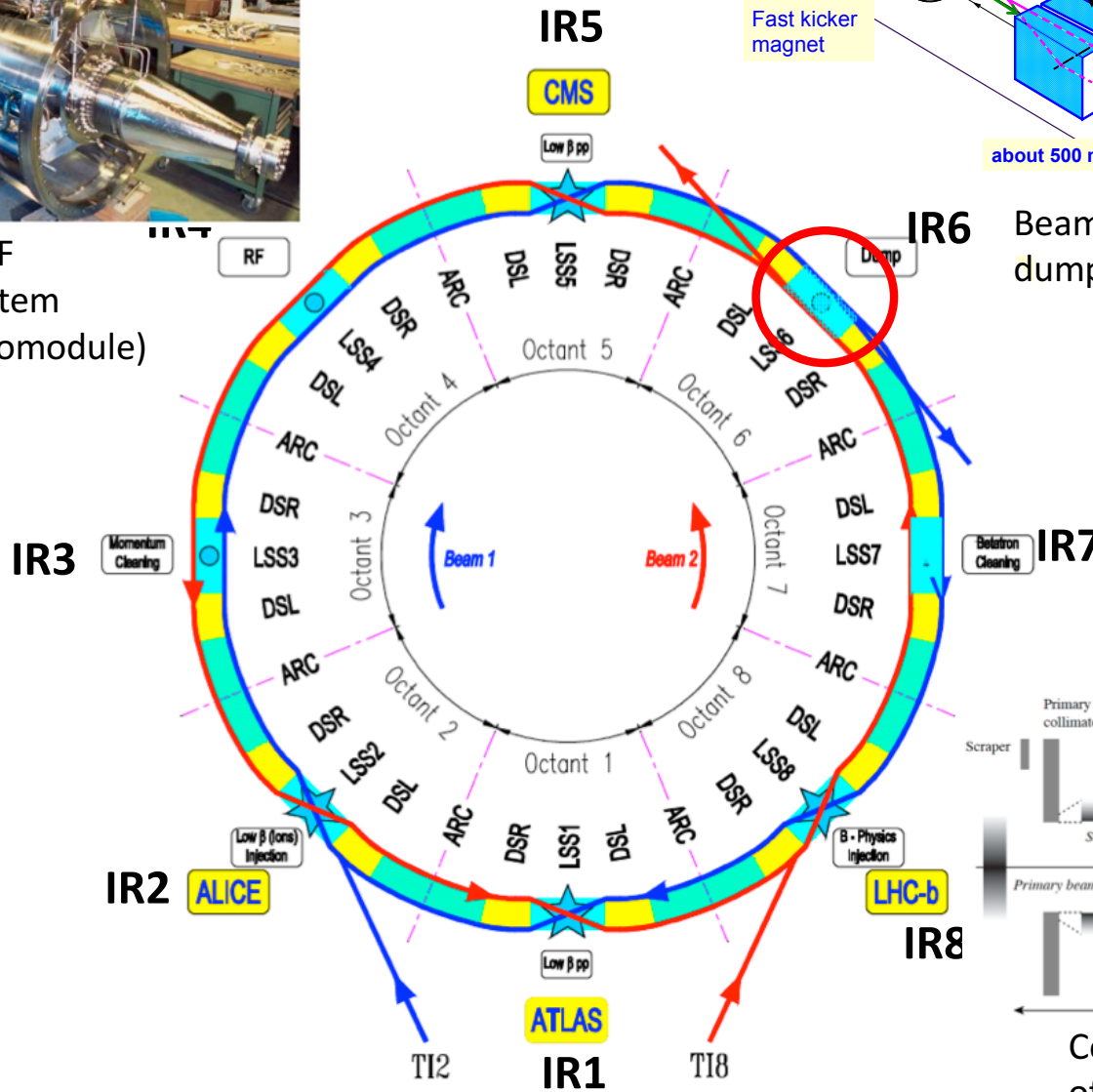


Collimation: betatron (IR7),
off-momentum (IR3)

LHC: 衝突点以外の挿入部

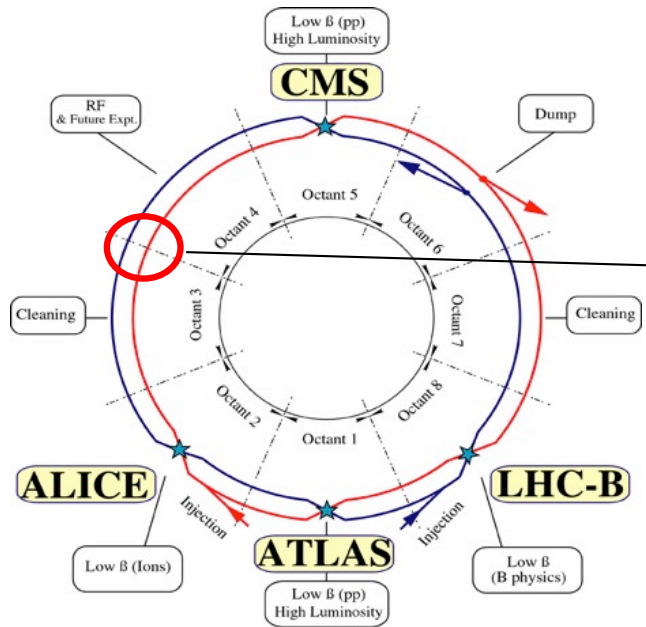


Main 400MHz RF Accelerating System
(Four-Cavity Cryomodule)

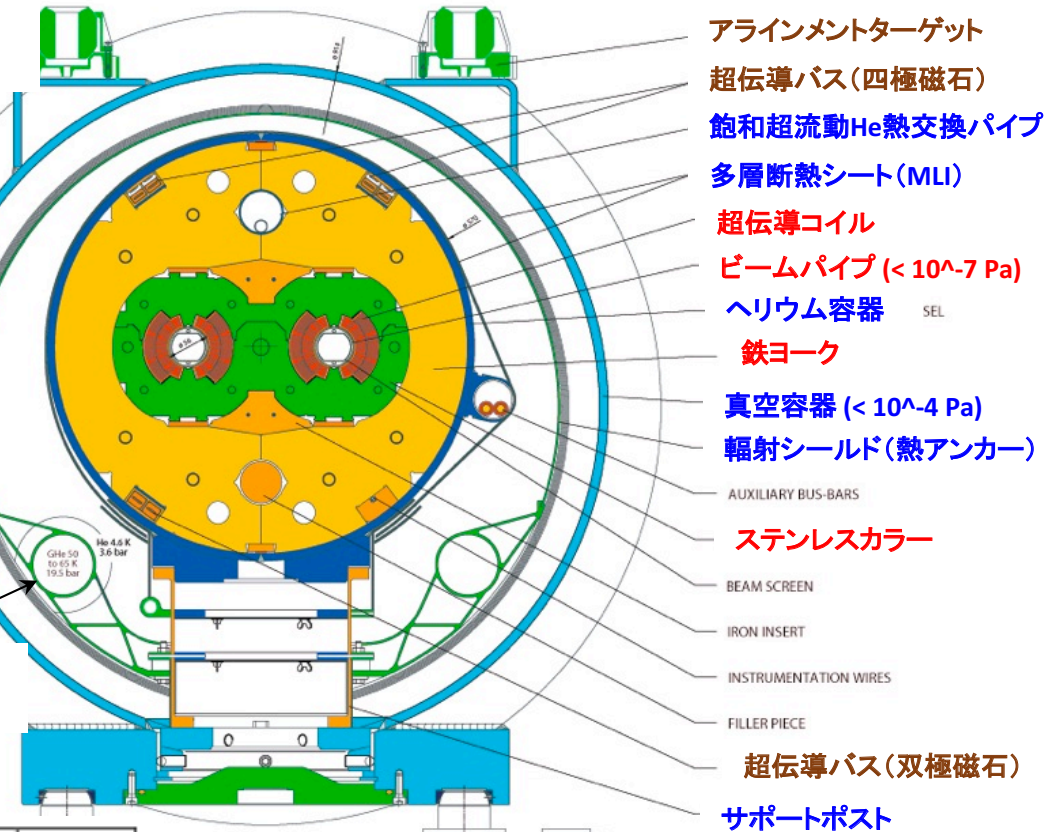


Collimation: betatron (IR7),
off-momentum (IR3)

LHC偏向用超伝導双極磁石



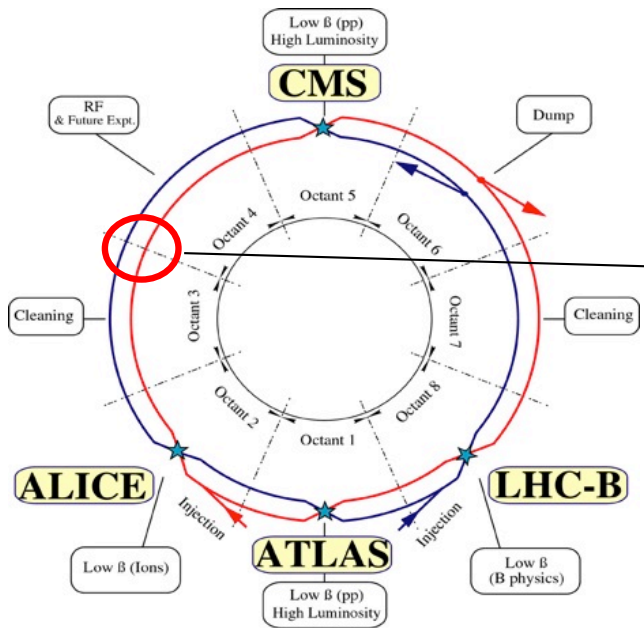
50K 20bar
Heガスパイプ



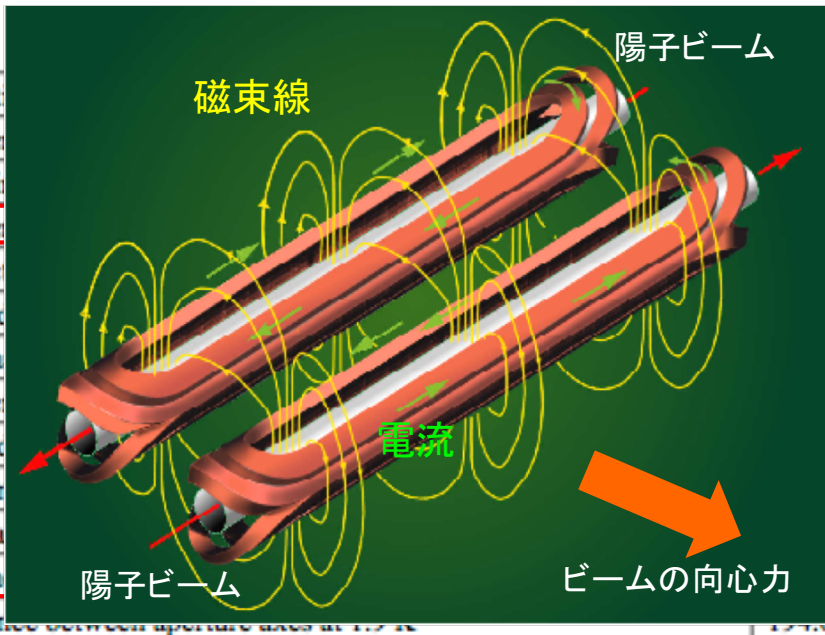
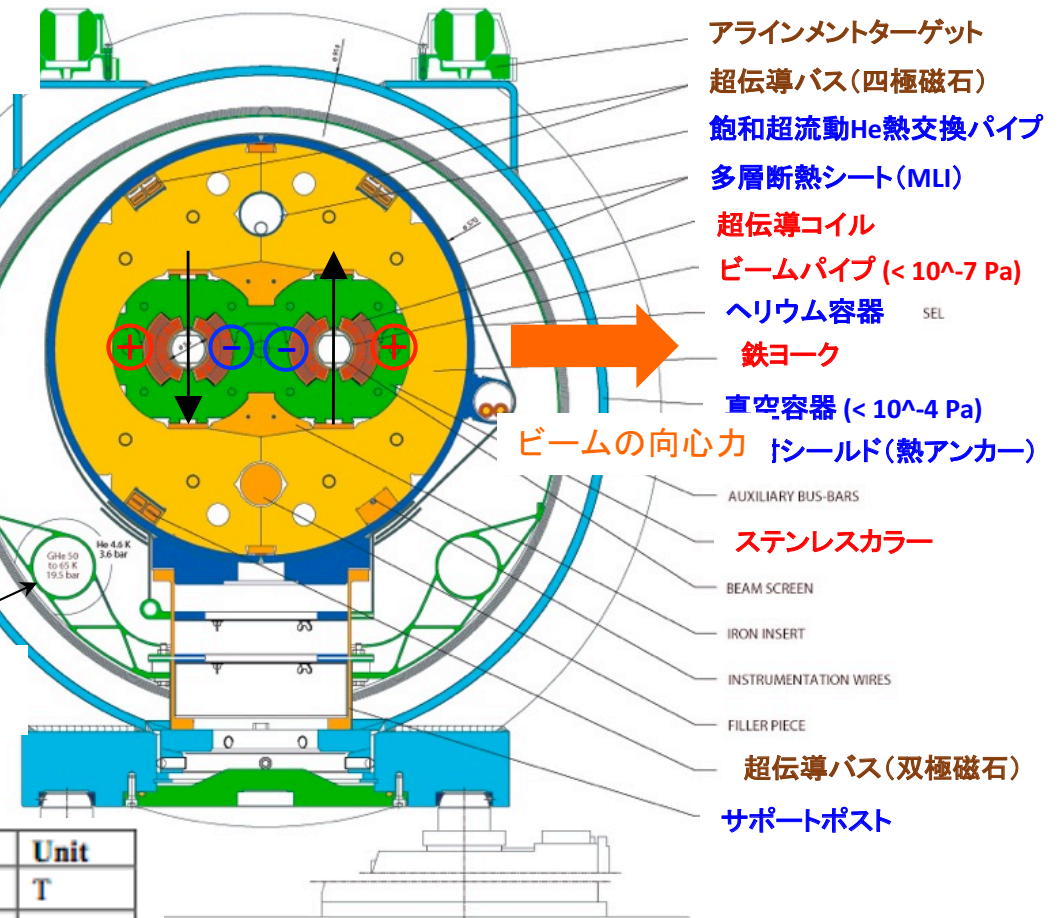
	Value	Unit
Injection field (0.45 TeV beam energy)	0.54	T
Current at injection field	763	A
Nominal field (7 TeV beam energy)	8.33	T
Current at nominal field	11850	A
Inductance at nominal field	98.7	mH
Stored energy (both apertures) at nominal field	6.93	MJ
Ultimate field	9.00	T
Current at ultimate field	12840	A
Stored energy (both apertures) at ultimate field	8.11	MJ
Maximum quench limit of the cold mass (from short samples)	9.7	T
Operating temperature	1.9	K
Magnetic length at 1.9 K and at nominal field	14312	mm
Distance between aperture axes at 1.9 K	194.00	mm

- コイル内径56mm、磁石直径570mm、真空容器外径914mm、15m長、1232台
- 1台の磁石に2つの超伝導コイル
 - 2つの相対する陽子ビームを同時に偏向
- CERNで研究開発
- 技術移転+構造仕様 → 3社が製造
 - Alstom-Jeumont (France),
 - Ansaldo Superconduttori (Italy),
 - Babcock Noell (Germany)

LHC偏向用超伝導双極磁石



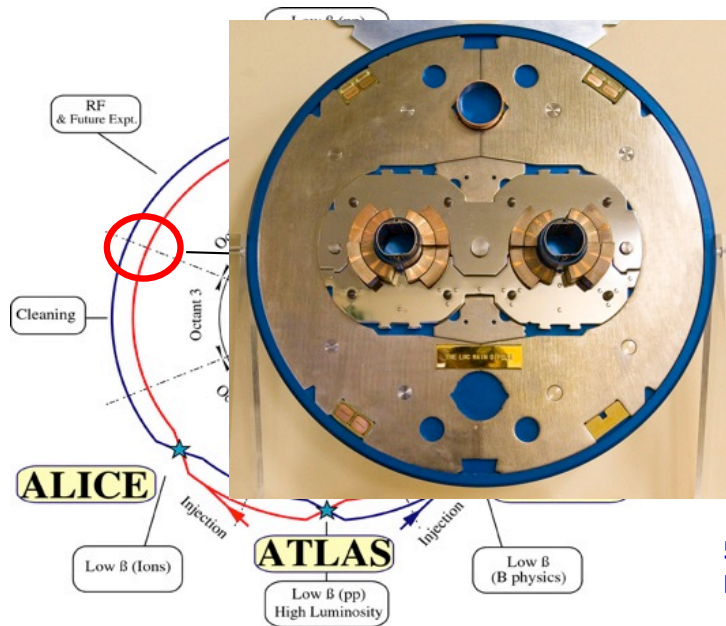
50K 20bar
Heガスパイプ



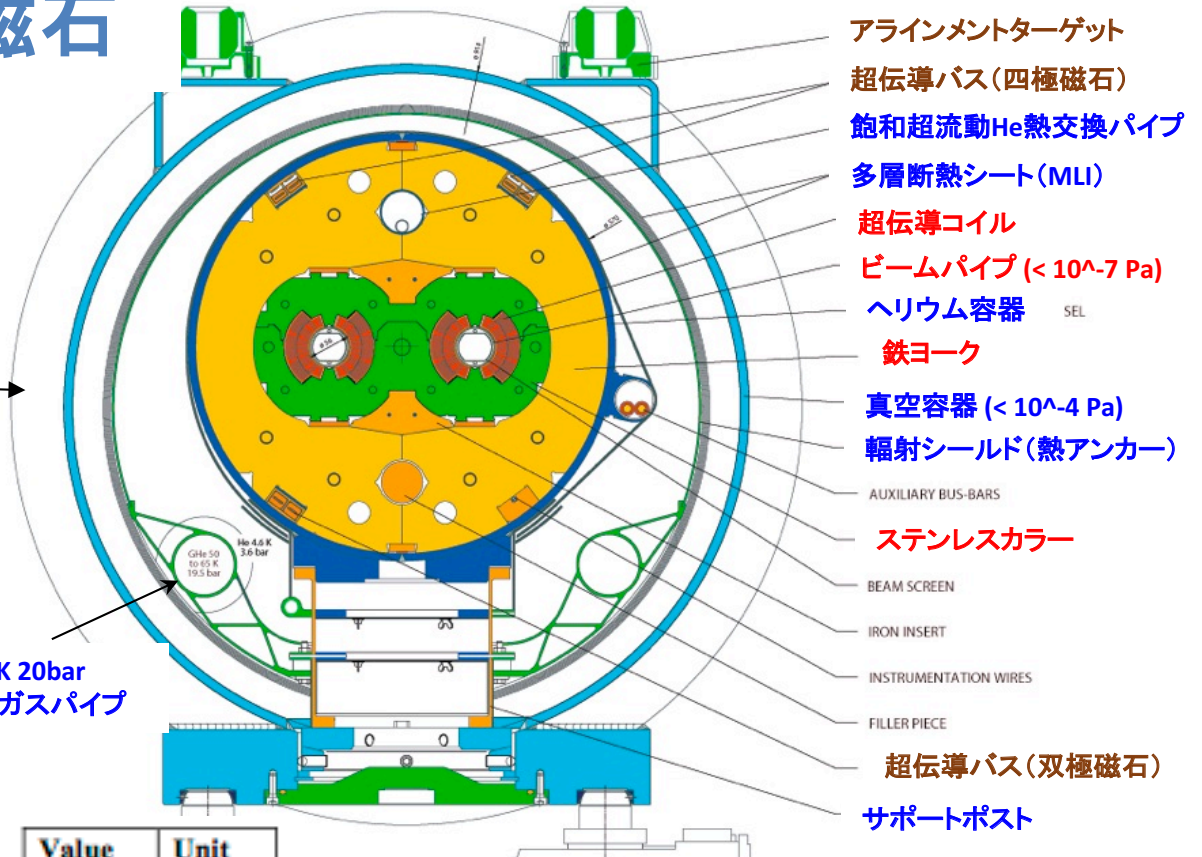
	Unit
Inject	T
Curre	A
Nomi	T
Curre	A
Induc	mH
Stor	MJ
Ultim	T
Curre	A
Stor	MJ
Maxim	T
Opera	K
Magn	mm
Distance between aperture axes at 1.5 m	mm

- コイル内径56mm、磁石直径570mm、真空容器外径914mm、15m長、1232台
- 1台の磁石に2つの超伝導コイル
 - 2つの相対する陽子ビームを同時に偏向
- CERNで研究開発
- 技術移転+構造仕様 → 3社が製造
 - Alstom-Jeumont (France),
 - Ansaldo Superconduttori (Italy),
 - Babcock Noell (Germany)

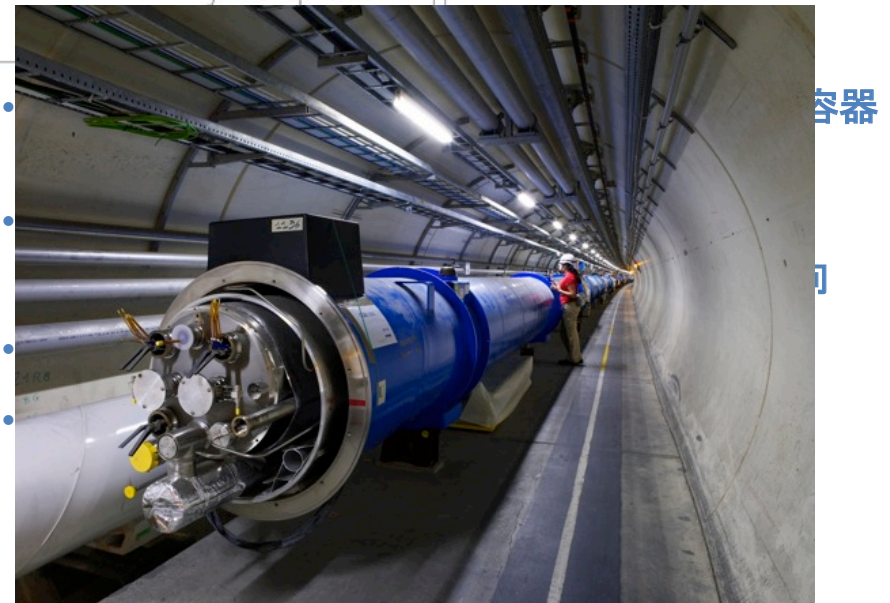
LHC偏向用超伝導双極磁石



50K 20bar
Heガスパイプ



	Value	Unit
Injection field (0.45 TeV beam energy)	0.54	T
Current at injection field	763	A
Nominal field (7 TeV beam energy)	8.33	T
Current at nominal field	11850	A
Inductance at nominal field	98.7	mH
Stored energy (both apertures) at nominal field	6.93	MJ
Ultimate field	9.00	T
Current at ultimate field	12840	A
Stored energy (both apertures) at ultimate field	8.11	MJ
Maximum quench limit of the cold mass (from short samples)	9.7	T
Operating temperature	1.9	K
Magnetic length at 1.9 K and at nominal field	14312	mm
Distance between aperture axes at 1.9 K	194.00	mm



Contents

- **CERN-LHC**
 - 概要、経緯
 - **日本の貢献**
 - 運転状況
- **LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)**
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- **将来計画: Future Circular Collider (FCC)**
- **まとめ**

LHC計画と日本

LHC建設での国際協力の経緯

- ・1994年12月:CERN理事会での建設決定。
- ・1995年6月:CERN理事会で日本政府(文部省)はLHC計画への参加表明(右図)。総計138.5億円の加速器建設協力。
- ・1996年インド、ロシア、カナダが参加表明。
- ・1996年:ATLASとCMS実験が承認。日本はATLASに参加。
- ・1997年:米国が参加表明。LHC計画が全世界規模の国際計画となった。



1995年6月に与謝野文部大臣(写真左)がCERN理事会に出席し、日本のLHC加速器建設協力を非加盟国の中で最も早く発表した。写真右はC. リュエリン=スミスCERN所長(当時)。

日本の加速器への貢献

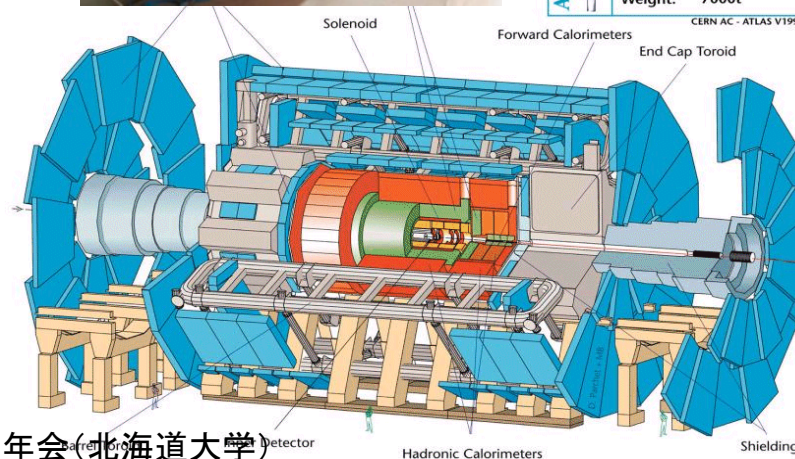
- ・KEKはLHC衝突点用超伝導四極磁石を開発。
- ・日本企業が日本の出資範囲で、入札直接参加、多くの企業による貢献が実現。

国際共同実験:ATLAS

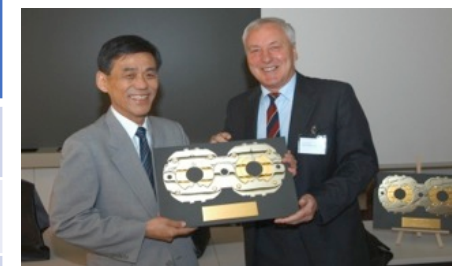
- ・日本グループはアトラス実験に計画当初から参加。高エネ研(KEK)・東京大・神戸大など15機関からの研究者・大学院生が約100名。
- ・検出器建設に貢献



Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t



LHC建設に貢献した主な日本企業			推定規模 億円(註)
古河電気工業	LHC加速器	超伝導ケーブル	~20*
新日本製鐵	LHC加速器	双極電磁石の特殊ステンレス材	~50*
東芝	LHC加速器	収束用超伝導四極電磁石	~15*
JFEスチール	LHC加速器	電磁石用非磁性鋼材	~5*
カネカ	LHC加速器	電磁石用ポリイミド絶縁テープ	~10*
IHI (+Linde)	LHC加速器	低温ヘリウムコンプレッサー	~20*
東芝	アトラス	超伝導ソレノイド	~10
浜松ホトニクス	アトラス,CMS, LHCb	シリコン検出器, 光電子増倍管, 光検出ダイオード	~10
川崎重工業	アトラス,CMS	LArカロリメーター容器, 鉄構造体	~10
林栄精器	アトラス	ワイヤーチェンバー	~5
東芝	アトラス	信号読み出し集積回路	~2
ソニー	アトラス	検出器信号アンプ	~1
ジーエヌディー	アトラス	トリガー用電子回路	~1
フジクラ	アトラス	耐放射線性光ファイバー	~1
クラレ	アトラス	シンチレーションファイバー	~1
有沢製作所	アトラス	銅箔ポリイミド電極シート	~1



古河電気工業



新日本製鐵



東芝



IHI & Linde

(註) 推定規模は、部分的な情報から推定しており、実際の契約額と相当にずれている可能性があります。

2017 あくまでも企業の貢献の規模の目安にすぎません。* 印は日本による建設協力資金が使用された事を示す。

日本の貢献 最終ビーム収束用四極磁石

Q1 & Q3 (MQXA): 高エネ研(16台)

Q2a & Q2b (MQXB): 米国フェルミ研(16台)

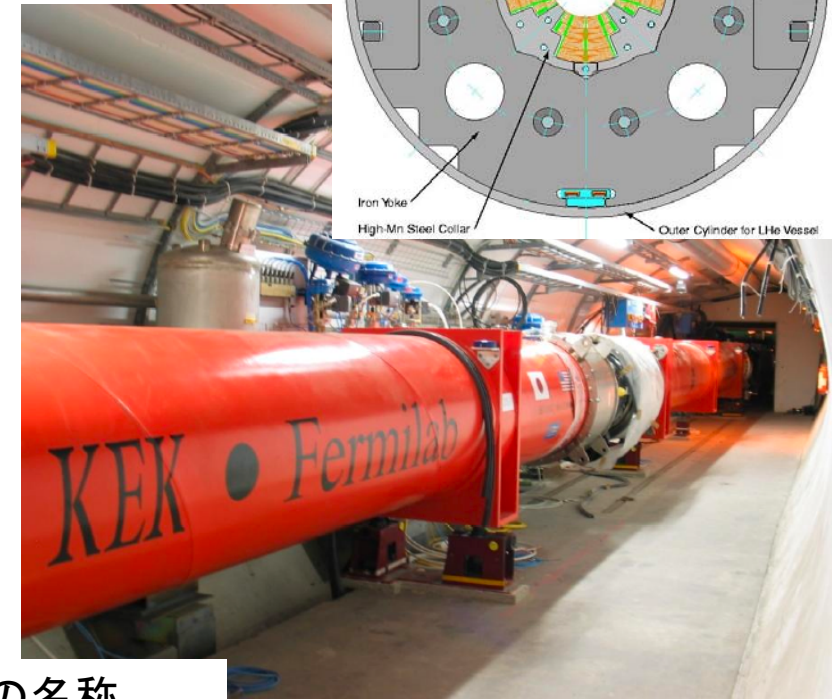
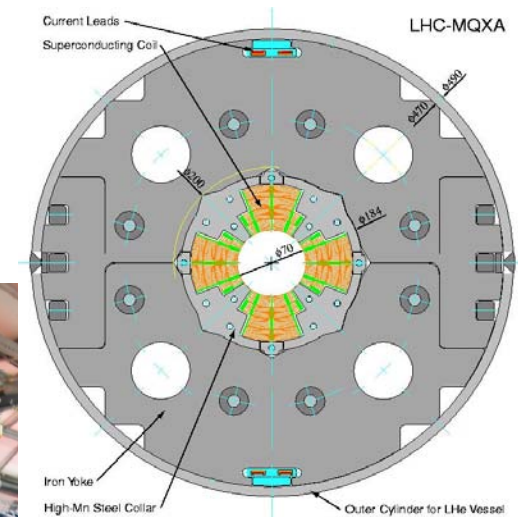
磁場勾配 = 215 T/m, コイル口径 = 70 mm **~ 9 T**

磁石長さ = 5.5 or 6.37 m, 運転温度 = 1.9 K

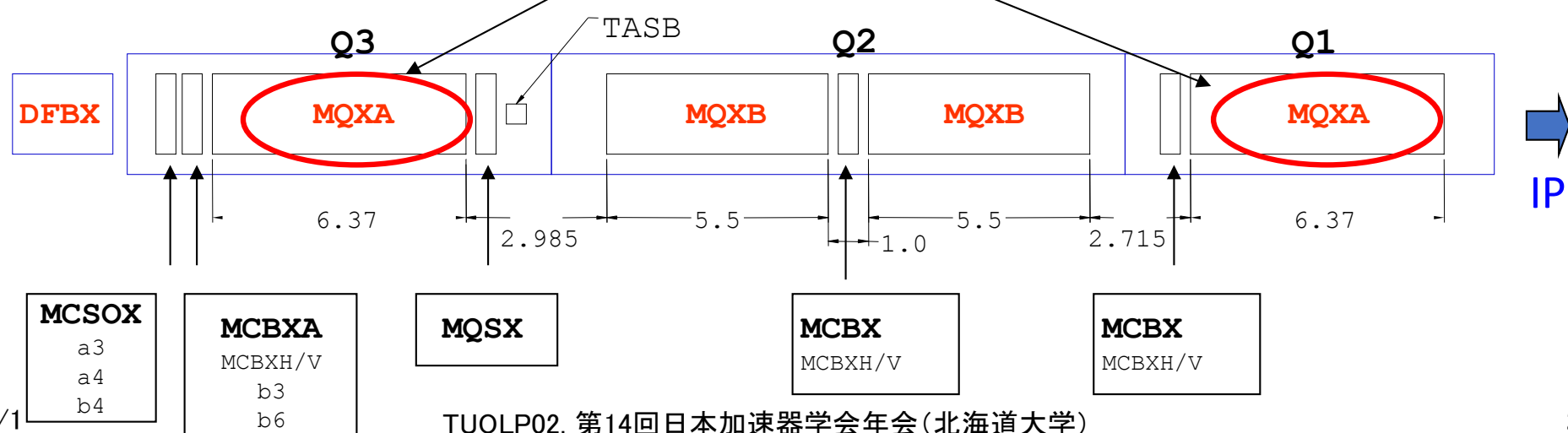
誤差磁場 < 1 unit (10^{-4})

ビームからの入熱(放射線): ~ 10 W/m

量産磁石製造: 東芝
超伝導ケーブル: 古河電工
精密打ち抜き: アキタファインブランキング
電気絶縁: 有沢製作所



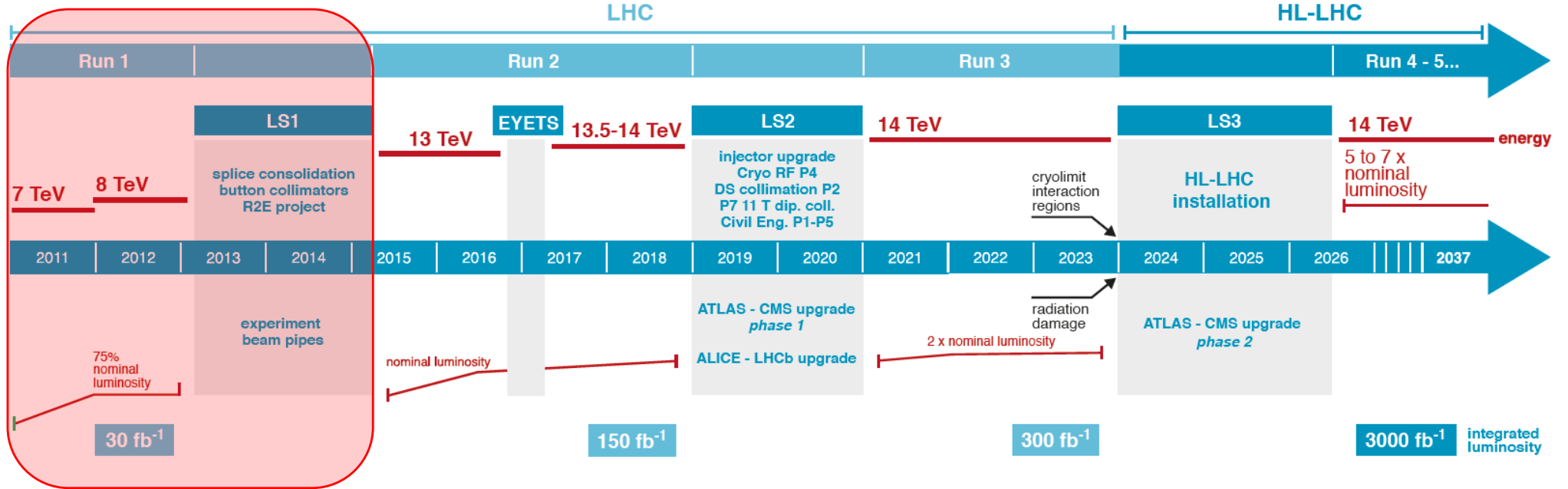
高エネ研担当磁石の名称



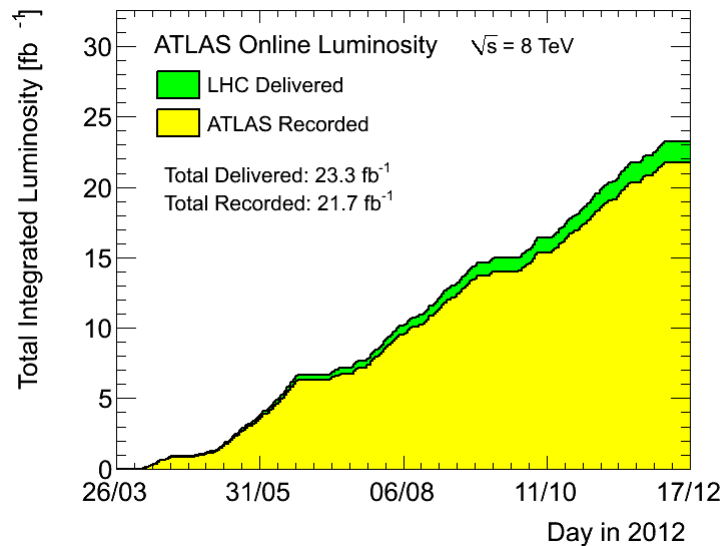
Contents

- **CERN-LHC**
 - 概要、経緯
 - 日本の貢献
 - **運転状況**
- **LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)**
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- **将来計画: Future Circular Collider (FCC)**
- **まとめ**

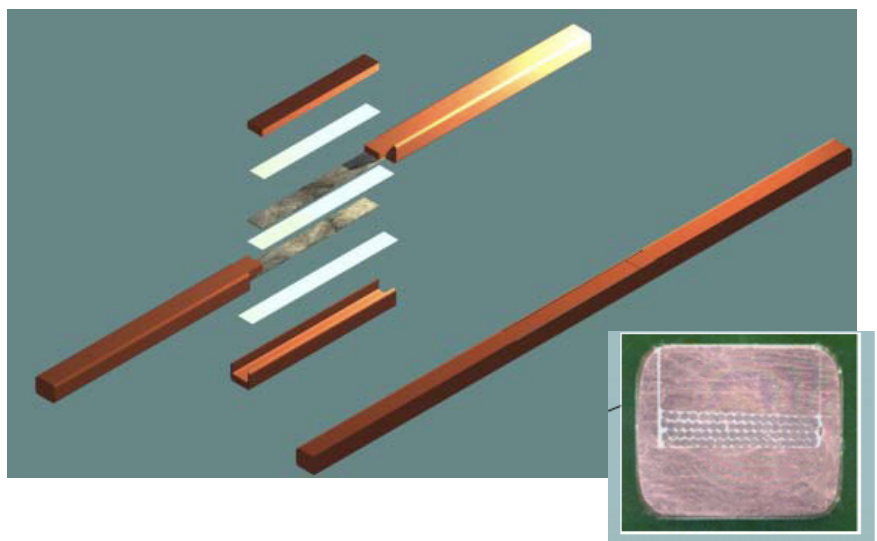
LHC / HL-LHC Plan



2012年の積分ルミノシティ



スプライス不良、ヘリウム漏洩事故(2008年9月)



- 原因
 - 接続部のハンダ施工不良、シャント(銅)が不連続
 - クエンチ検出に不備
 - 巨大な蓄積エネルギー
- 対策
 - **2012までは4TeV(電流も定格の4/7)に下げて運転**
 - "consolidation" in LS1(2013-2014)
 - LHC全ての磁石間接続部が対象:ハンダ、シャント追加
 - その他の改修(磁石交換、安全弁等)+QA
 - 2015からエネルギー増加:4TeV → 6.5~7 TeV

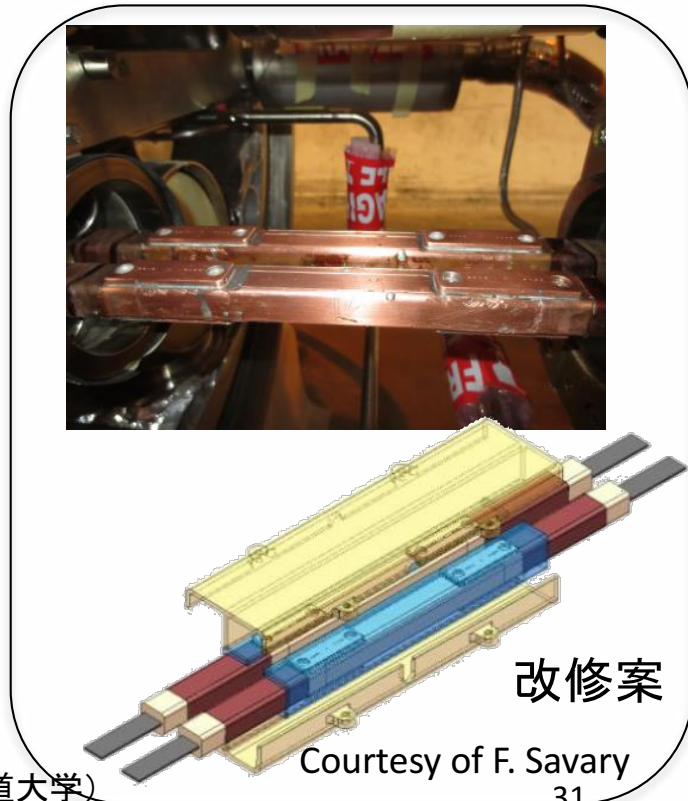
Defect B:
Soldered splice with
outside void and/or
lack of bonding



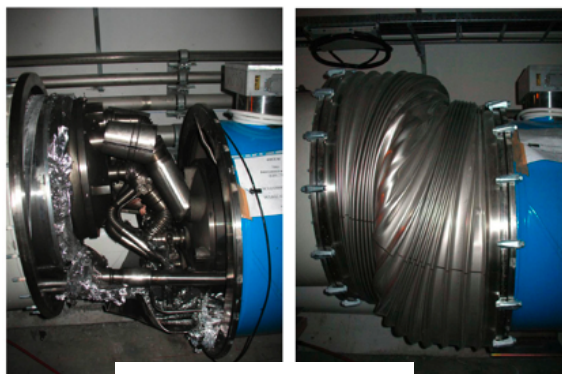
Defect C:
Badly soldered splice
($R > 0.3 \text{ n}\Omega$) with *inside*
void and/or lack of bonding



Defect D:
Splice with void and/or
lack of bonding and
small amount of SnAg
in vertical gap



接続不良の例





The main 2013-14 LHC consolidations

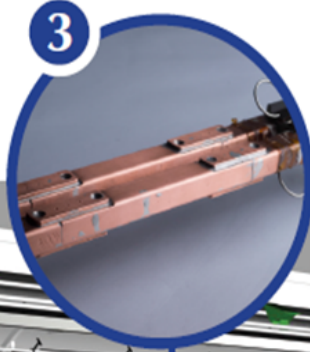
1695 Openings and final reclosures of the interconnections



Complete reconstruction of 3000 of these splices



Consolidation of the 10170 13kA splices, installing 27 000 shunts



Installation of 5000 consolidated electrical insulation systems



300 000 electrical resistance measurements



10170 orbital welding of stainless steel lines



18 000 electrical Quality Assurance tests



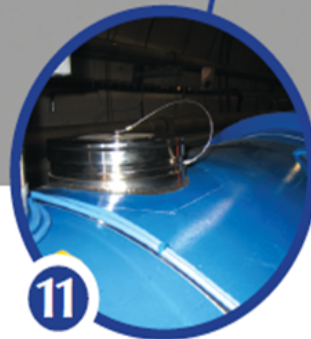
10170 leak tightness tests



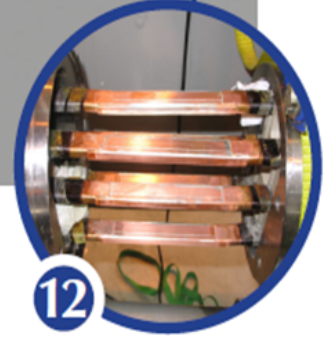
3 quadrupole magnets to be replaced



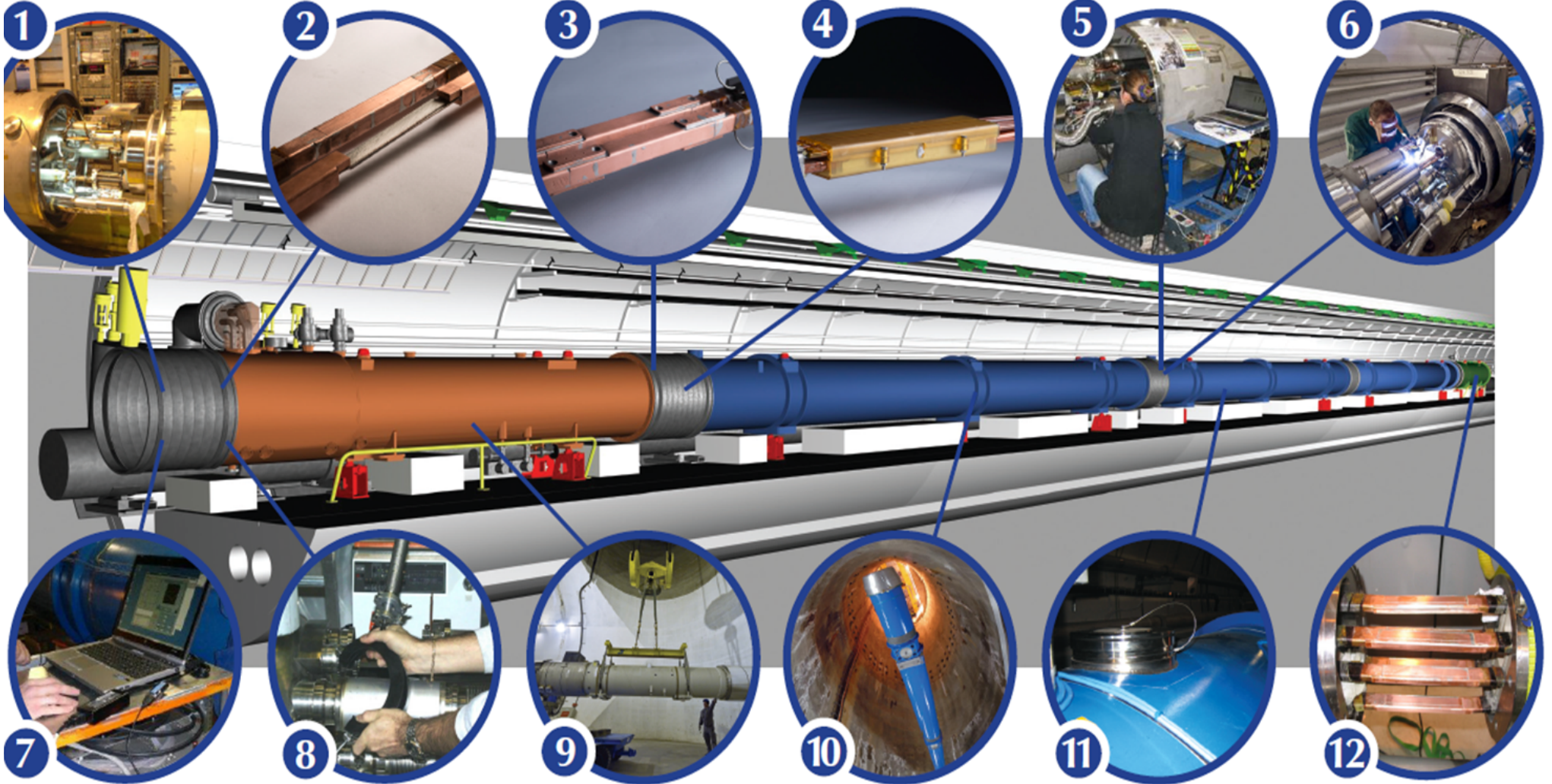
15 dipole magnets to be replaced



Installation of 612 pressure relief devices to bring the total to 1344



Consolidation of the 13 kA circuits in the 16 main electrical feed-boxes





The main 2013-14 LHC consolidations

1695 Openings and final reclosures of the interconnections

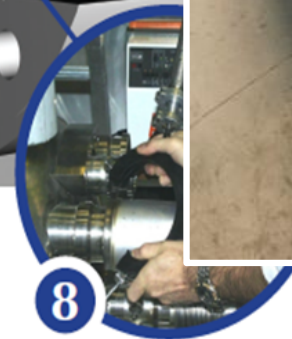
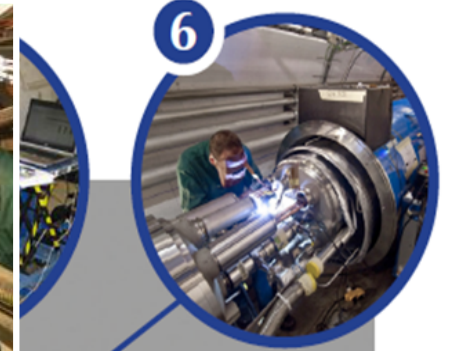
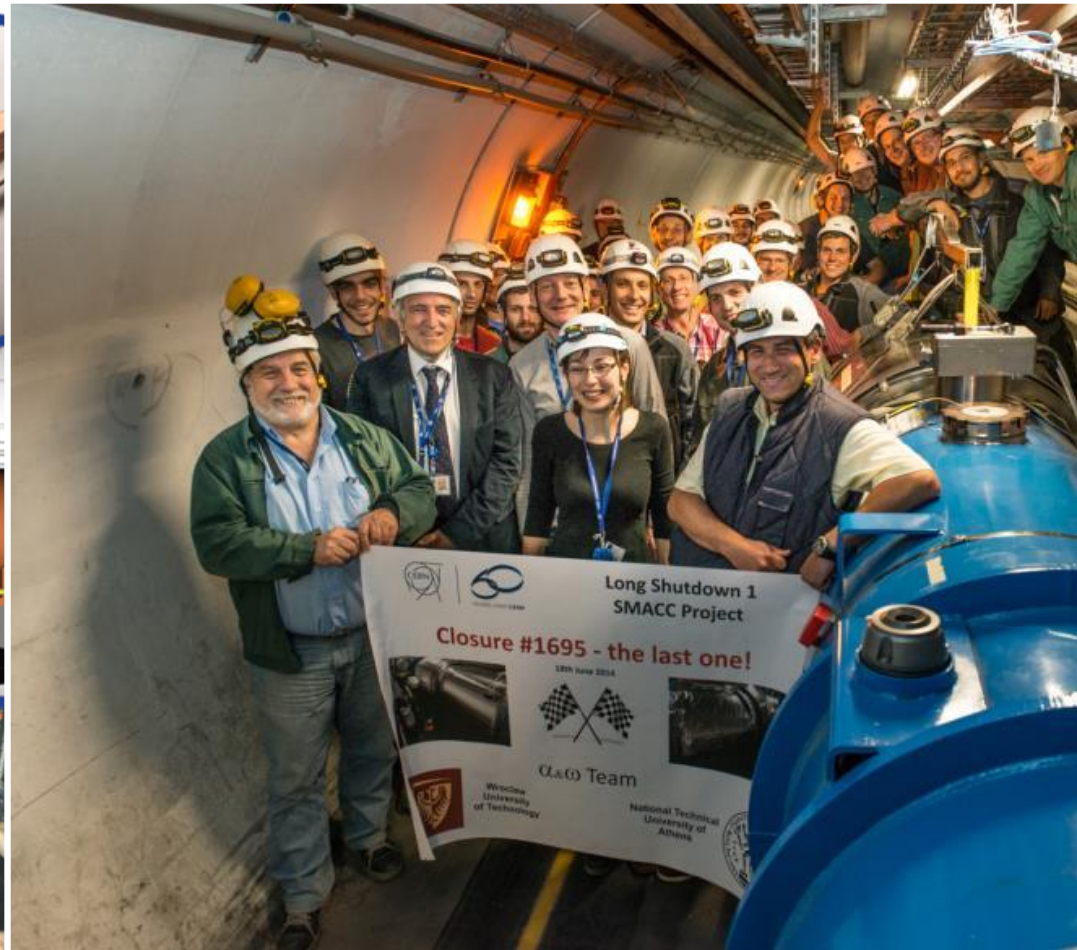
Complete reconstruction of 3000 of these splices

Consolidation of the 10170 13kA splices, installing 27 000 shunts

Installation of 5000 consolidated electrical insulation systems

300 000 electrical resistance measurements

10170 orbital welding of stainless steel lines



18 000 electrical Quality Assurance tests

10170 leak tightness tests

3 quadrupole magnets to be replaced

15 dipole magnets to be replaced

Installation of 612 pressure relief devices to bring the total to 1344

Consolidation of the 13 kA circuits in the 16 main electrical feed-boxes

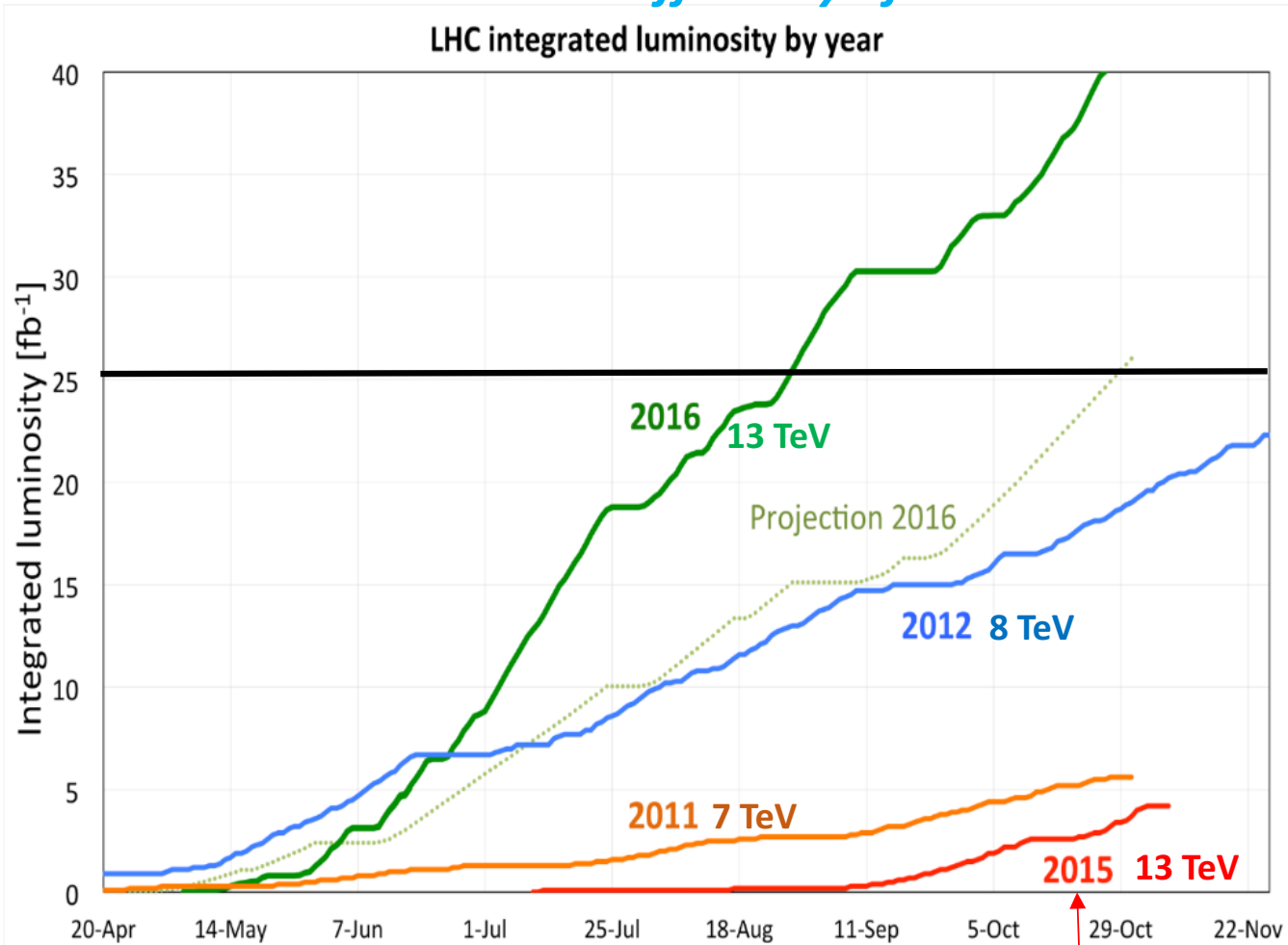
LHC 2016: Production year

Peak luminosity > $1.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

~40 fb⁻¹ in both ATLAS and CMS

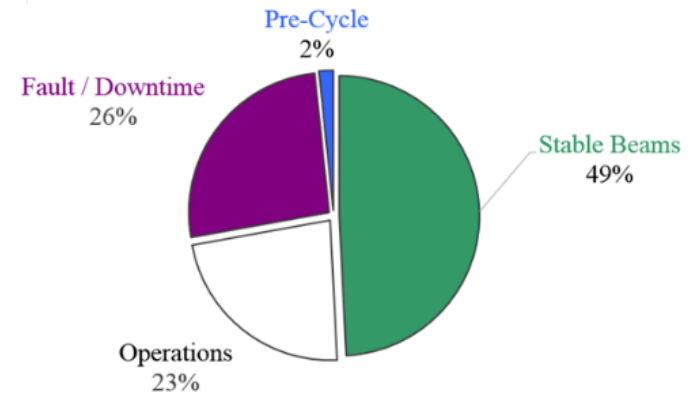
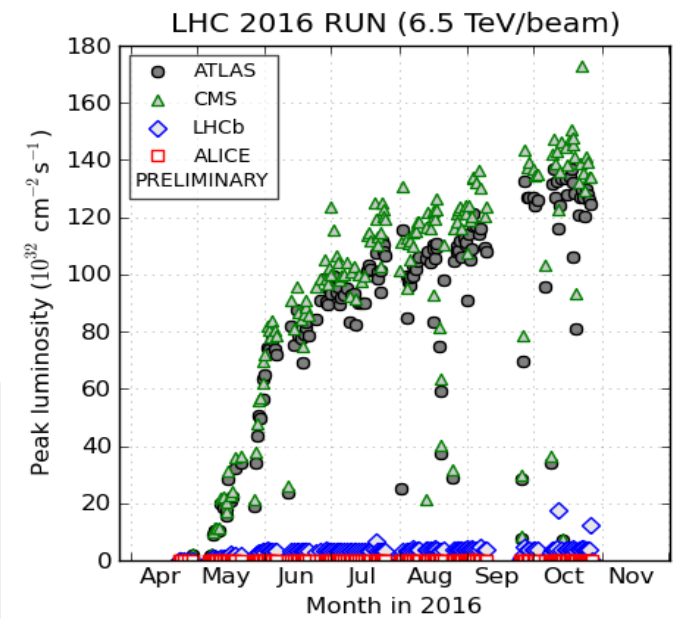
Higher Integrated Luminosity:

“Peak Lumi.” & “Efficiency of Stable Beams”



F. Bordry

Commissioning



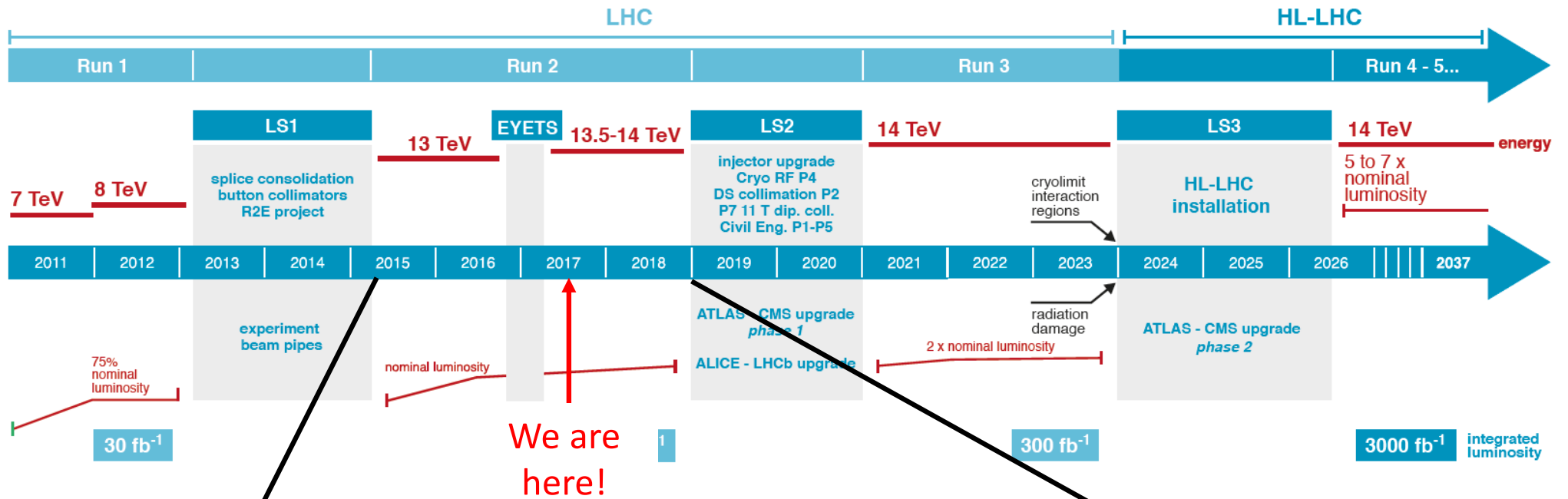
≈153 days physics ≈3738.7 hours

	Duration [h]
Stable Beams	1839.5
Fault / Downtime	980.0
Operations	857.9
Pre-Cycle	61.3

TS1 - TS2 : stable beams 58 %

TS2 - TS3 : stable beams 54 %

LHC / HL-LHC Plan



We are here!

Run 2 Performance (2016 Chamomix)

	Peak lumi E34 cm ⁻² s ⁻¹	Days proton physics	Approx. int lumi [fb ⁻¹]
2015	~0.5	65	3
2016 (Plan) Achieved	1.2 1.4	160 153	30 ~40
2017 (Plan)	1.5	160	35
2018 (Plan)	1.5	160	35

LHC Limitation

SPS beam-dump

- # of bunches per injection limited to **96**
- Total number of bunches: **2200**



TIDVG#4 installation (and TIDVG#3 removal) will be installed and bake-out in tunnel foreseen **to be finished by early April 2017 (ready for beam operation).**

LHC Injection kickers

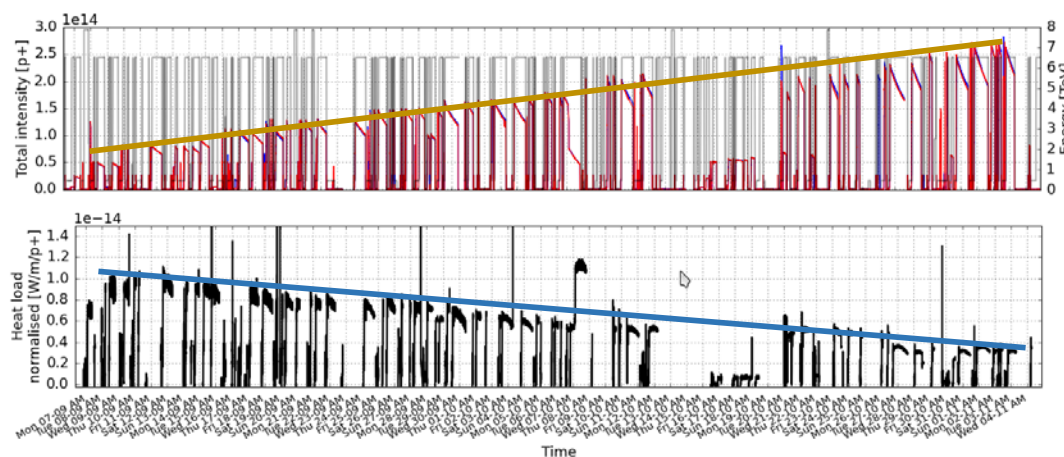
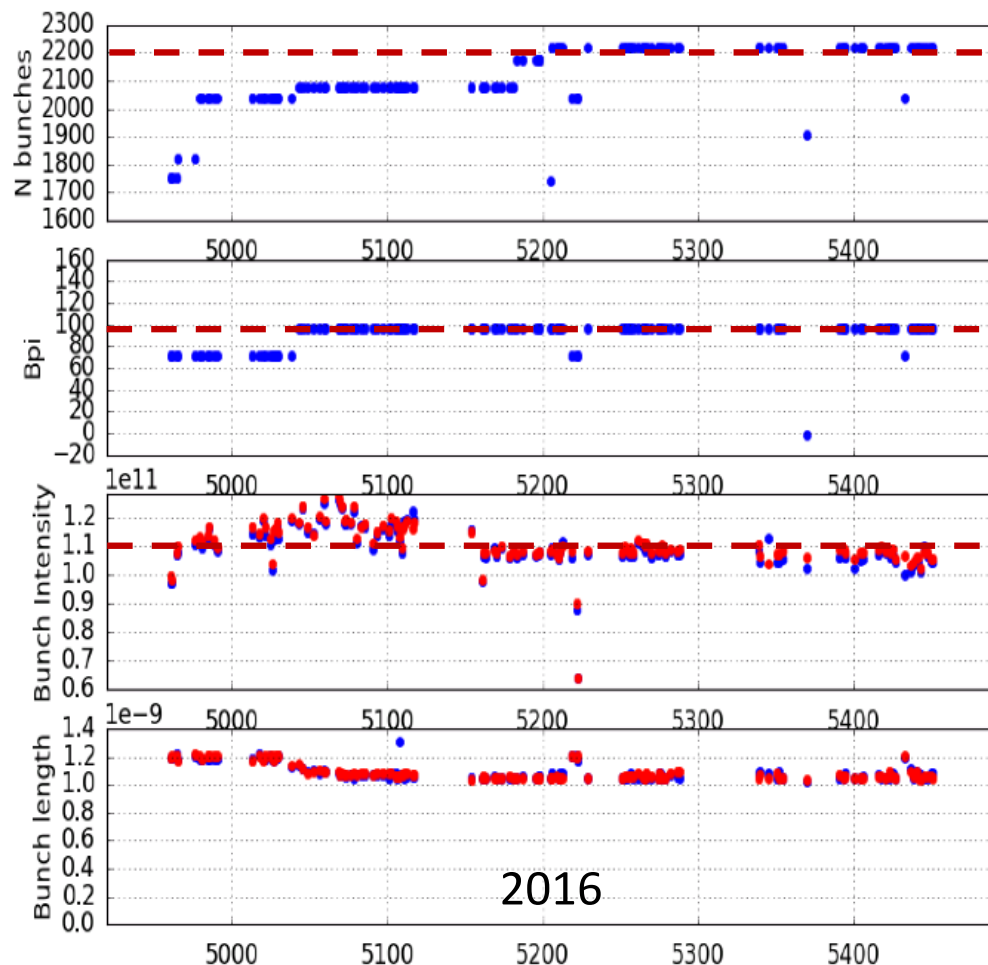
- Outgassing from ceramic
- Bunch population limited to around **1.1×10^{11}**

IT Cryogenics

- Guaranteed cryogenic power is 250 W
--> **$L_{peak} = 1.75e^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for 6.5 TeV**

Electron cloud

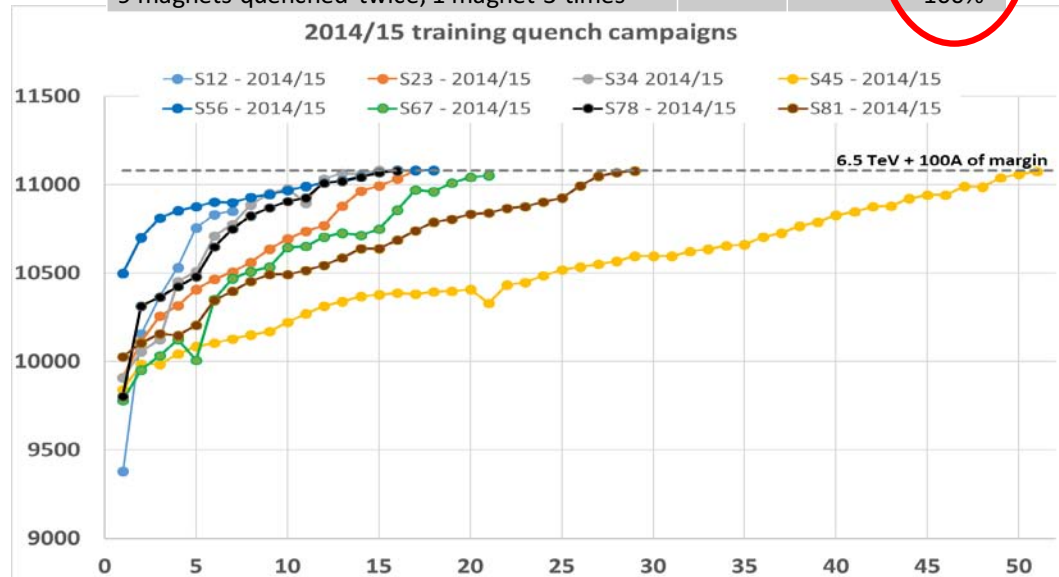
- Still significant heat-load within cryogenic limits
- Dynamics – well handled by cryogenics feed-forward – no impact on operations in the present conditions
- Conditioning takes place **parasitically at flat-top during physics!**



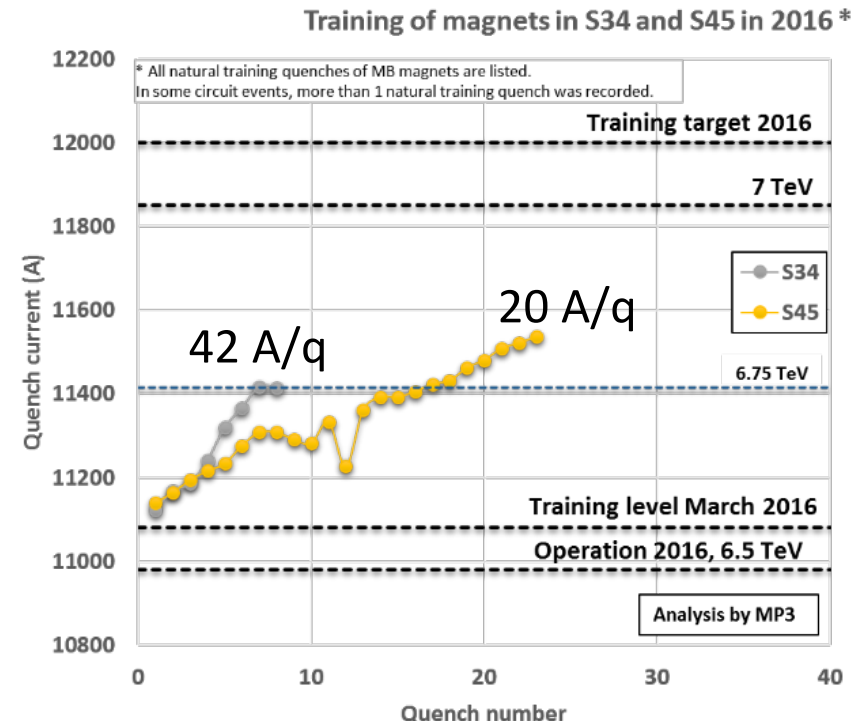
2016 Training Campaign in sector 34 and 45

F. Bordry
S. Le Naour

171 ramps :	Firm 1	Firm 2	Firm 3
179 magnets trained	3%	15%	82%
9 flat top quench @11080A during HWC		55%	45%
9 magnets quenched twice; 1 magnet 3 times			100%



2014/2015: 4 TeV => 6.5 TeV
179 quenches in 3.5 months



2016: Towards 7 TeV
32 quenches in 10 days

- The phenomenon looks more statistical than weak identified magnets.
- Estimates based on the model: **500-600 quenches** (include second quench) are needed to reach **7 TeV**. (E. Todesco)

NO change of beam energy (13 TeV) in 2017 and 2018

Goal is to prepare the LHC to run at 14 TeV during Run 3.

LHC 2017 : Parameters and Plans

F. Bordry

Parameter	Design	2015	2016	2017
Bunch population N_b [10^{11} p]	1.15	~1.2	~1.1	~1.2
No. bunches k	2780	2244	2220	2556
Emittance ε [mm mrad]	3.5	~3.5	~2.2	~2.2
β^* [cm]	55	80	40	40 (33)
Full crossing angle [μ rad]	285	290	370 / 280	300 (340)
Peak luminosity [10^{34} cm $^{-2}$ s $^{-1}$]	1.0	0.51	1.4	~1.7 (1.9)
Integrated luminosity [fb $^{-1}$]		4.5	40	~ 45

Push LHC performance

(145 days of physics)

Mitigate e-cloud by scrubbing with longer trains

Increase the number of bunches => 2556

Increase the bunch intensity

Possibly decrease the β^* from 40cm to 33 cm

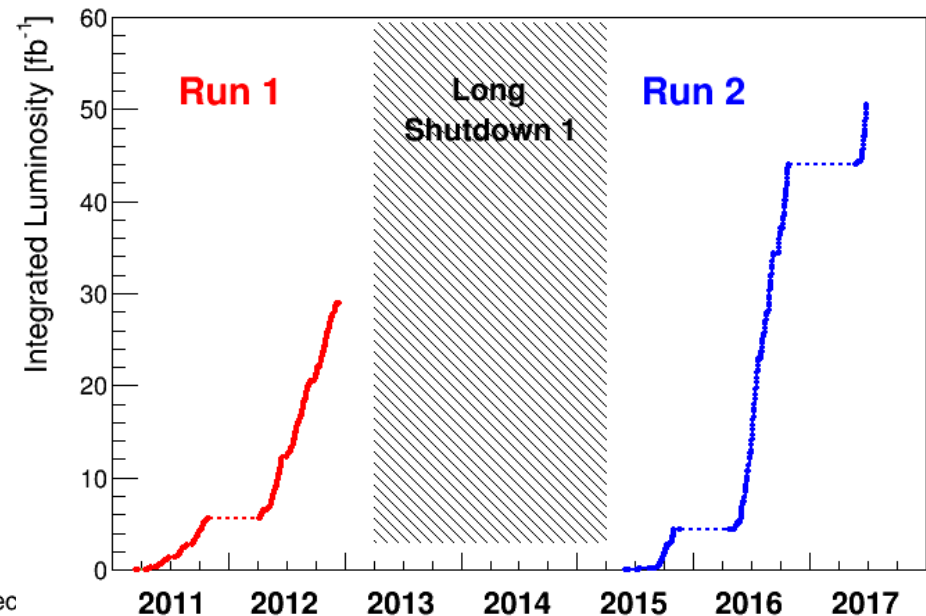
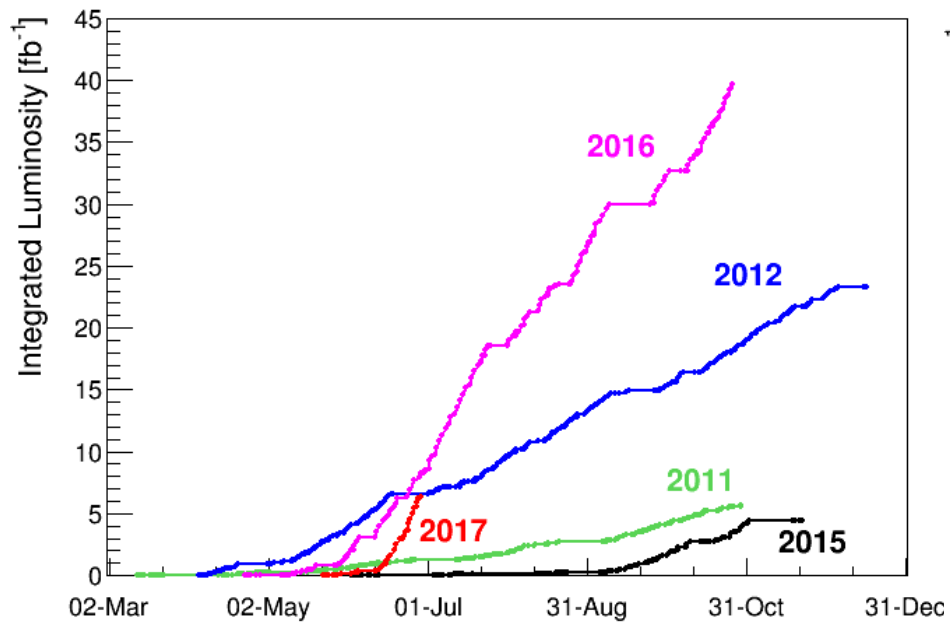
**Continue to increase performance
and
to maintain availability ~50%**

Prepare for HL-LHC

Run with ATS optics (Achromatic Telescopic squeeze)

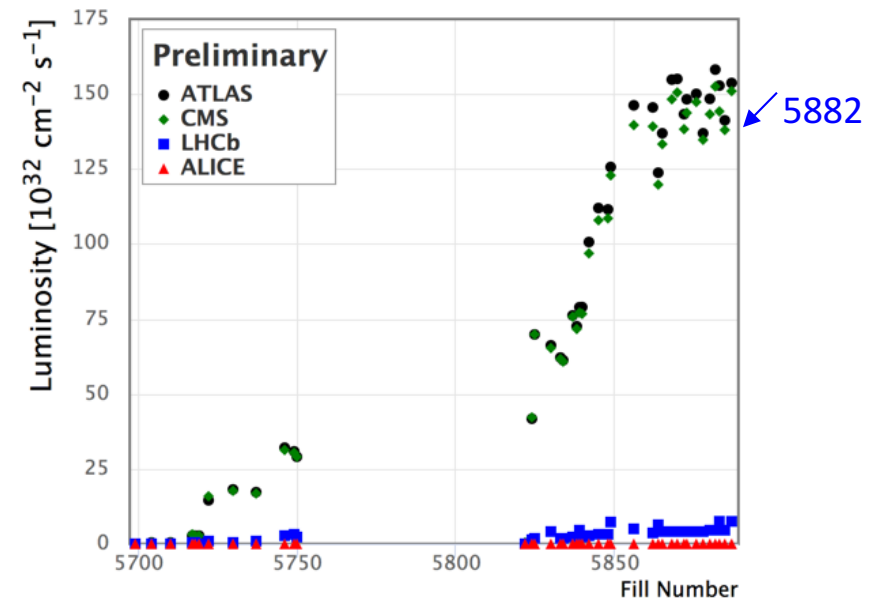
Test levelling schemes (crossing angle, β^*)

Use full RF detuning



Peak Luminosity

- Very steep performance ramp up
- 2556 bunches
- Peak Luminosity $1.58 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
(fill #5882)
- Integrated luminosity : 6.4 fb^{-1}



新粒子(750GeV)?

2016年5月16日 日本経済新聞

ノーベル賞「ヒッグス」を超える新粒子? 実験大詰め

編集委員 吉川和輝

2016/5/16 6:30 | 日本経済新聞 電子版

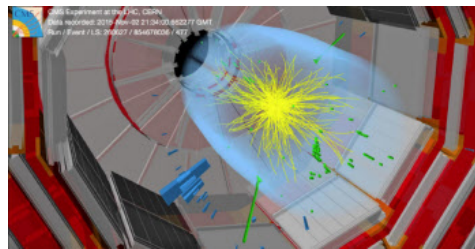
(1/2ページ)



ノーベル物理学賞の授賞対象となった「ヒッグス粒子」が発見されたスイス・ジュネーブにある「LHC」（大型ハドロン衝突型加速器）で、未知の新粒子発見への期待が高まっている。昨年までの実験結果からヒッグス粒子の約6倍の質量を持つ新粒子の可能性があるデータが得られ、5月に始まった今年の実験で存在するかどうかが判明する。新粒子の正体を巡っては複数の説が出されており、もし存在すれば、現在の素粒子の標準理論を塗り替える大発見となる。

■スイスのLHCで検証 7～8月にも結論

新粒子を示唆する観測データはLHCのある欧州合同原子核研究機関（CERN）が2015年12月に開いた報告会で明らかにした。12年にヒッグス粒子を発見した2つの国際共同実験グループ（ATLASとCMS）がそれぞれ、光速近くまで加速した陽子を正面衝突させる実験で、750ギガ（ギガは10億）電子ボルト（GeV）のエネルギー（質量）を持つ粒子が生まれたことを示唆するデータを示した。新粒子はすぐに壊れ、そこから光子2つが飛び出したとみられる。この2つの光子のエネルギーを測定することで、もともとの粒子の質量を割り出した。ヒッグス粒子を発見したときと同じ方法だ。



LHCの実験グループの「CMS」での衝突実験の様子。陽子衝突によって様々な粒子ができる（黄色の線）。750 GeVの新粒子ができた場合は光子が2方向に飛び出す（緑の長い線）= CERN提供

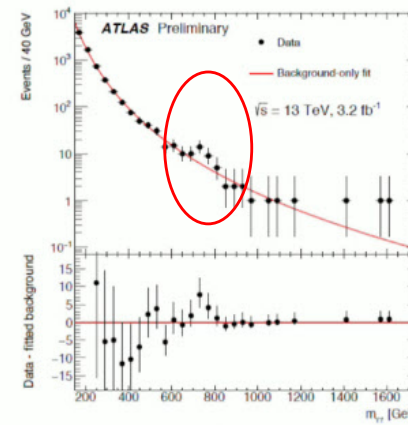
750 GeVという質量は、トップクォーク（173 GeV）、ヒッグス粒子（125 GeV）などこれまで発見されたどの素粒子と比べても断然大きい。加速器による新粒子の探索実験には極めて高い統計精度が求められ、新粒子が「発見された」とするには、観測データの平均からのズレが標準偏差（ σ =シグマ）の5倍（ 5σ ）以上ずれる必要がある。5 σ の場合、誤差による間違いの確率は約300万分の1だ。ATLAS実験では4 σ 弱、CMS実験では3 σ 程度といずれも「発見」のレベルに達していないが、独立して行った両実験でほぼ同じ質量のところに粒子の存在を示すデータが見られたことで「もしや」という期待が高まった。

CERNは5月9日、LHCの運転を約半年ぶりに再開したと発表。11月初旬まで約半年間稼働し、陽子衝突の回数を昨年の300兆回から約8倍の2500兆回に増やして実験データを大量にとる。ATLAS日本グループの共同代表である浅井祥仁・東京大学教授は「新粒子と確認できるかどうか正直なところ五分五分。統計的なバラツキである可能性もまだ高い。実験開始後1カ月もあればデータは十分たまるので、7月あるいは8月に新粒子かどうかの結論が出る」と予想する。

■現在の素粒子の標準理論を大きく塗り替える可能性

新粒子の情報が流れた直後から、その正体を議論する論文が続々と発表されている。浅井教授によると「大きく分けて3つの考え方がある」という。

1つ目は、新粒子がヒッグス粒子の仲間である可能性だ。現在の標準理論は電子、クォーク、ニュートリノなどヒッグス粒子を含めて17種類の素粒子があるとする。これを拡張して、すべての素粒子にそれぞれ「超対称性粒子」というパートナー粒子が存在するという理論がある。そこでは、既に見付かったヒッグス粒子より重い超対称性粒子のヒッグス粒子の存在が予想されている。新粒子が超対称性粒子であれば、初めての発見となる。



画像の拡大

陽子衝突で光子2つが出たときの回数（縦軸）とエネルギー（横軸）をプロットしたもの。750 GeVのエネルギーのところにピークが見える= ATLASグループ提供

2つ目の可能性は、3次元空間を超える「余剰次元」の存在を示す現象であることだ。万物を説明する究極理論の有力候補、超弦理論では、重力を伝える粒子（重力子）を含むすべての素粒子は振動する微小な弦（ひも）であり、世界は10次元からなると考える。我々が3次元の空間しか認識できないのは、残りの次元（余剰次元）が小さく丸め込まれているためであるという理解だ。その小さい空間で振動する弦は、加速器実験では今回くらいの重さの粒子に見える可能性もある。余剰次元の存在が確認されれば、これも初めての成果となる。

3番目は、複数の素粒子が結合してできた「複合ヒッグス粒子」である可能性だ。この考えによると、ヒッグス粒子は素粒子ではなく、テクニフェルミオンという未知の素粒子が2つ結びついてできたものだとされる。ヒッグス粒子を含め17種類の素粒子で組み立てられた標準理論を根底から書き換えることにつながる。

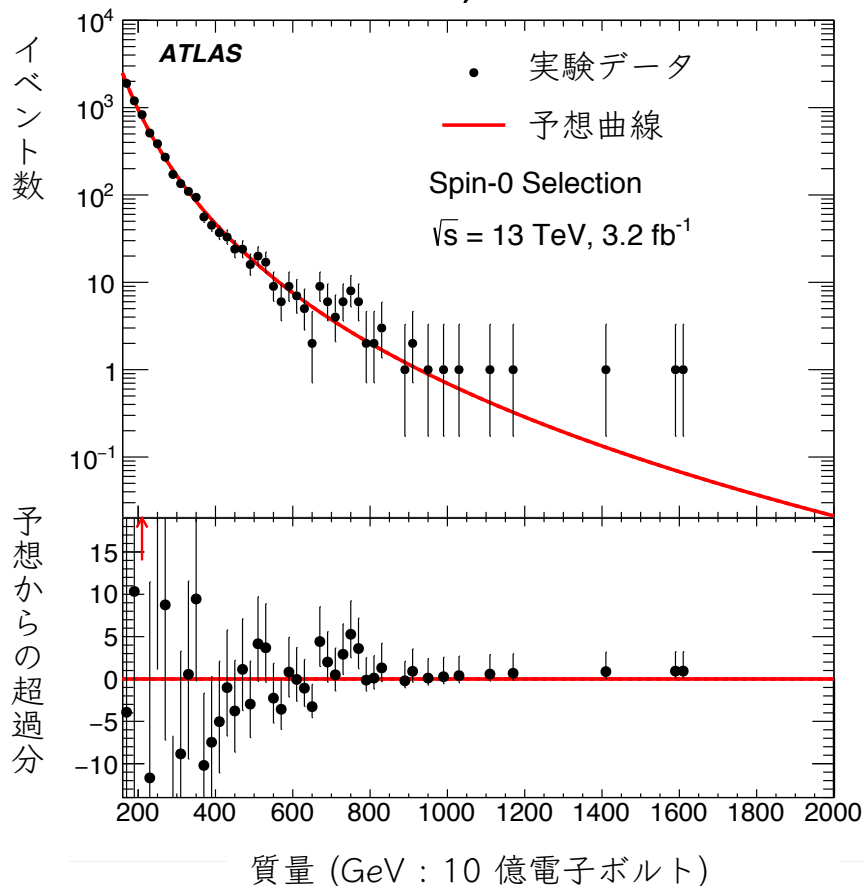
一方、浅井教授のグループは、750 GeVの質量を持った粒子が2段階で崩壊した可能性も視野に入れて、データ解析を進めることにしている。この場合、ダークマター（暗黒物質）の候補である新粒子が途中で生まれているシナリオも考えられるという。

新粒子候補を巡る予想は様々だが「新粒子の発見が本当なら、ヒッグス粒子の時の比ではないくらいインパクトは大きい」（浅井教授）。突然登場した新粒子候補への視線は熱くなるばかりだ。

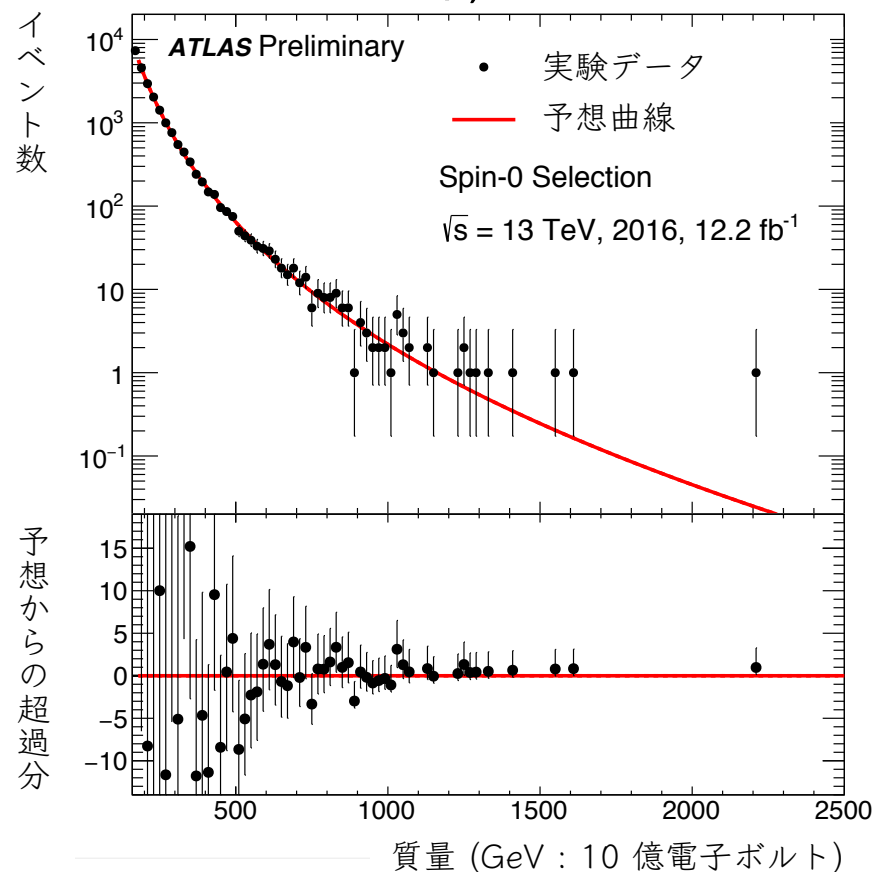
新粒子(750GeV)?

2つの光子に崩壊する共鳴状態の探索

2015年, 3.2 fb⁻¹



2016年, 12.2 fb⁻¹

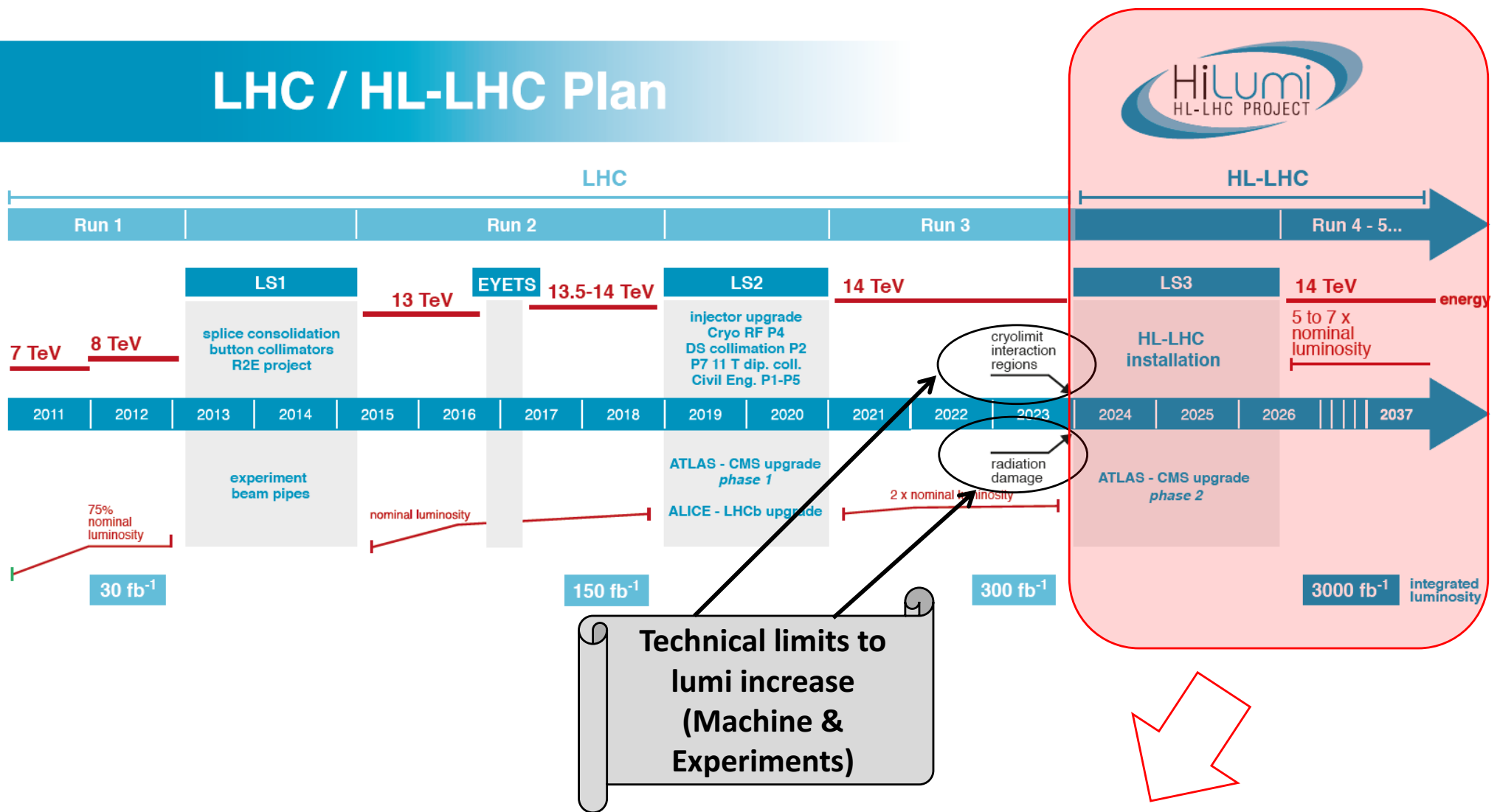


優位な超過は再現されなかったため、2015年の観測結果は『データの統計的なふらつき』によるものと考えられる。

Contents

- CERN-LHC
 - 概要、経緯
 - 日本の貢献
 - 運転状況
- LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- 将来計画: Future Circular Collider (FCC)
- まとめ

LHC / HL-LHC Plan



HL-LHC: High Luminosity LHC
Target: 3000 fb⁻¹, 5x10³⁴ cm⁻² sec⁻¹
(Nominal LHC: 300 fb⁻¹, 1x10³⁴ cm⁻² sec⁻¹)

Upgrading Scenario

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

$$R = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*} \right)^2}$$

Geometric reduction factor

For Higher Peak Luminosity

- Increasing beam current **x 5.5**
 - LHC Injectors Upgrade (LIU)
 - while keeping small emittance...

- Small β^* **x 3.7**

- New IR magnets

- Large aperture Quads and beam separation dipole

- Matching section magnets

- Strong correctors

- New optics & Layout

- Achromatic Telescopic Squeeze

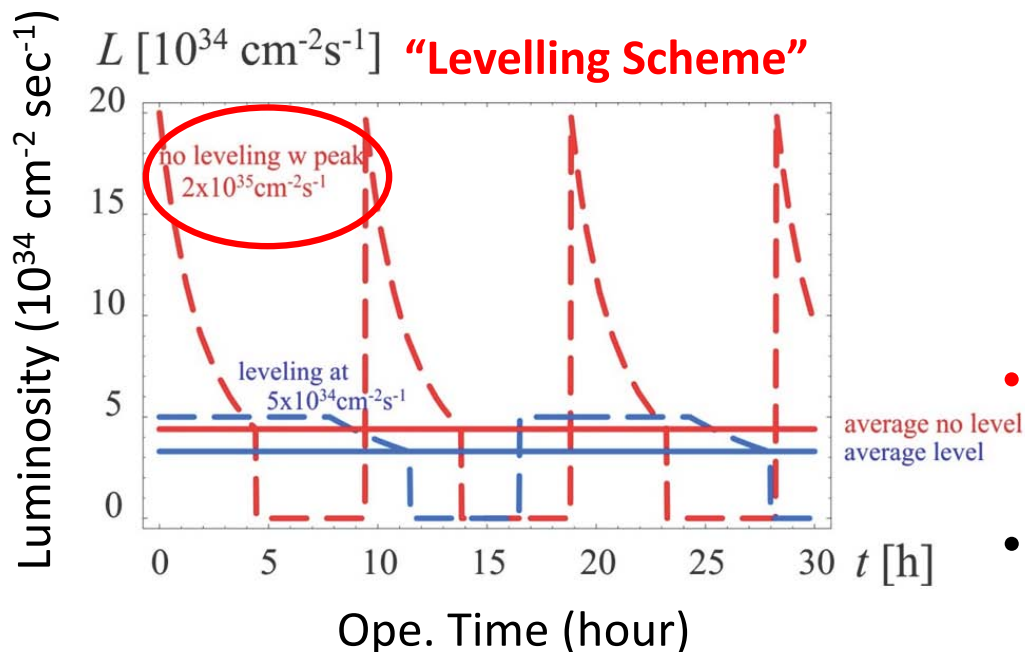
- New crossing angle

- Enhancement of collision efficiency

- Crab-Cavities for IR **If not, x 1/2.8**

- Suppression of Pile-Up events

- Levelled by detuning of optics



Works around the LHC Ring



L. Rossi

2 GÉNIE CIVIL

2 nouvelles galeries de 300 mètres et 2 puits près d'ATLAS et de CMS.

3 CAVITÉS « CRABE »

32 cavités supraconductrices « crabes » pour chacune des expériences ATLAS et CMS pour orienter les faisceaux avant les collisions.

3



Cryo@P1&P5
2 x 18 kW
@ 4.5 K
(3kW@1.9K) (!!)

Cryo@P4
6 kW @ 4.5 K



“High Luminosity”



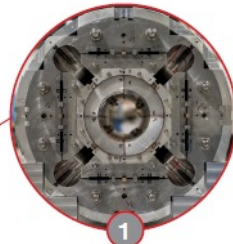
Significant increase of beam stored energy, heat loads, radiation

- 11 T Nb₃Sn Dipole and LEN collimator
- New service tunnel: “Double Decker”
- SC Link (MgB₂), R2E,
- New cryogenics plants
- Tungsten beam shield
- Etc...

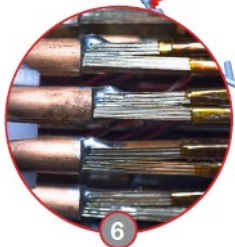
1 AIMANTS DE FOCALISATION

12 aimants quadripôles plus puissants pour chacune des expériences ATLAS et CMS pour concentrer plus fortement les faisceaux avant les collisions.

1



ATLAS

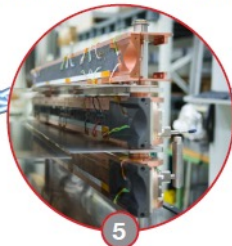


6 LIGNES SUPRACONDUCTRICES

Des lignes de transmission électrique à base d'un supraconducteur haute température pour transporter le courant vers les aimants depuis les nouvelles galeries près d'ATLAS et CMS.

6

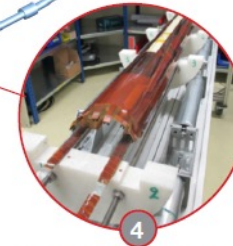
LHCb



5 COLLIMATEURS

15 à 20 nouveaux collimateurs et 60 collimateurs remplacés pour renforcer la protection de la machine.

5

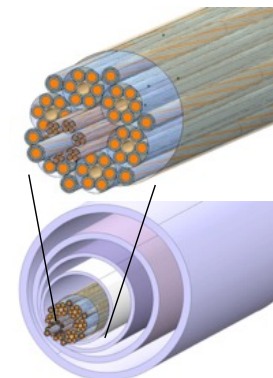
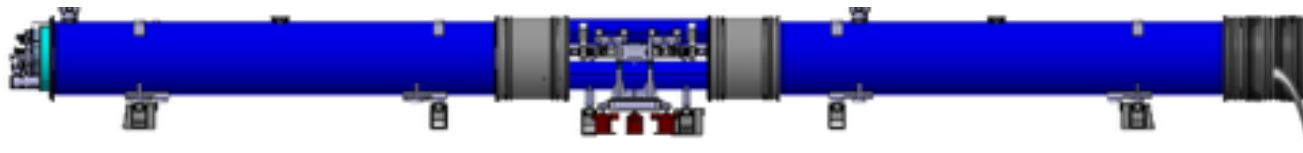


4 AIMANTS DE COURBURE

4 paires d'aimants de courbure dipôles plus courts et plus puissants pour libérer de la place pour les nouveaux collimateurs.

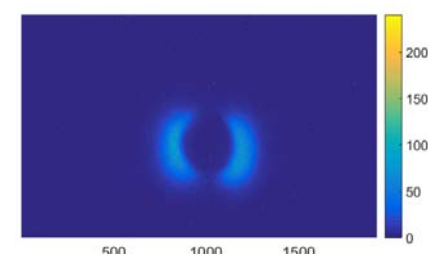
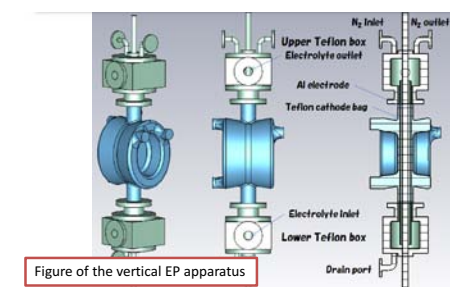
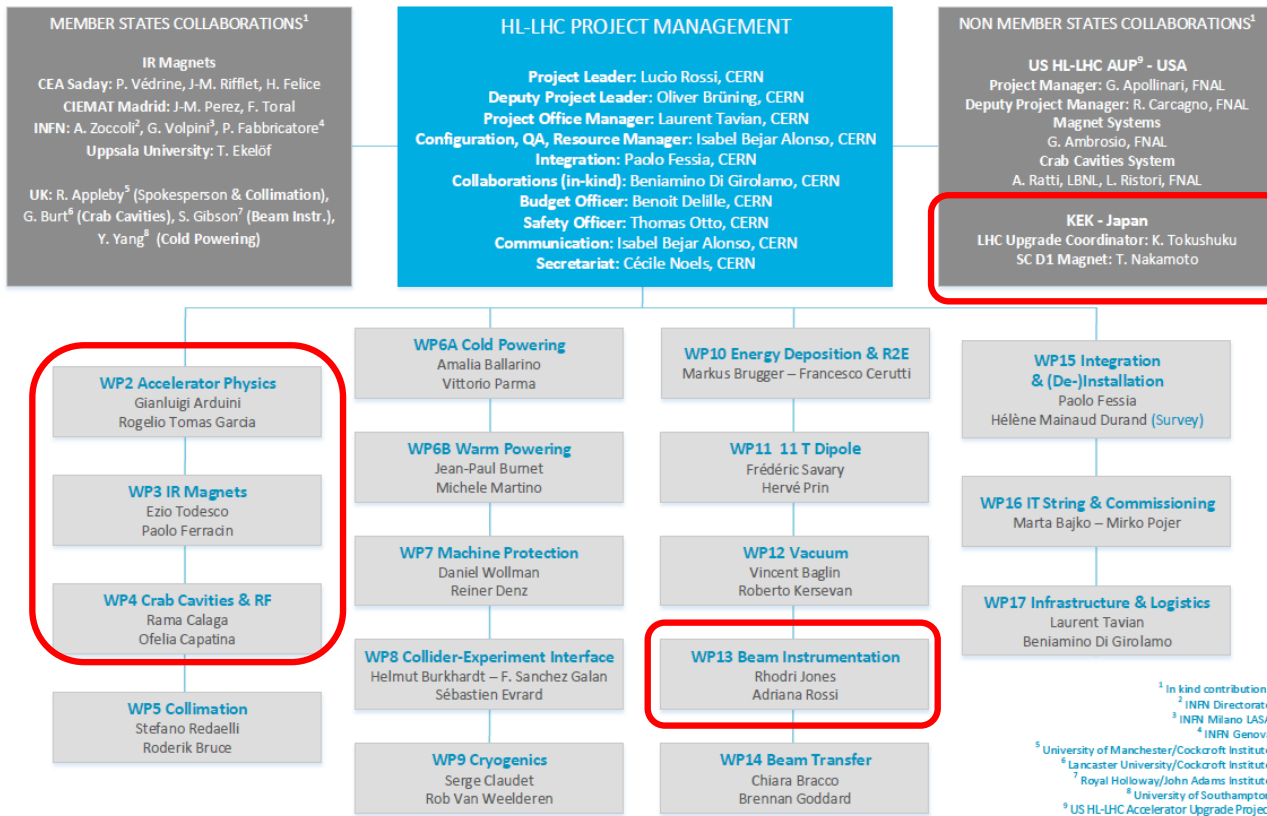
4

11 T Nb₃Sn Dipole and LEN collimator



HL-LHC Organization

L. Rossi



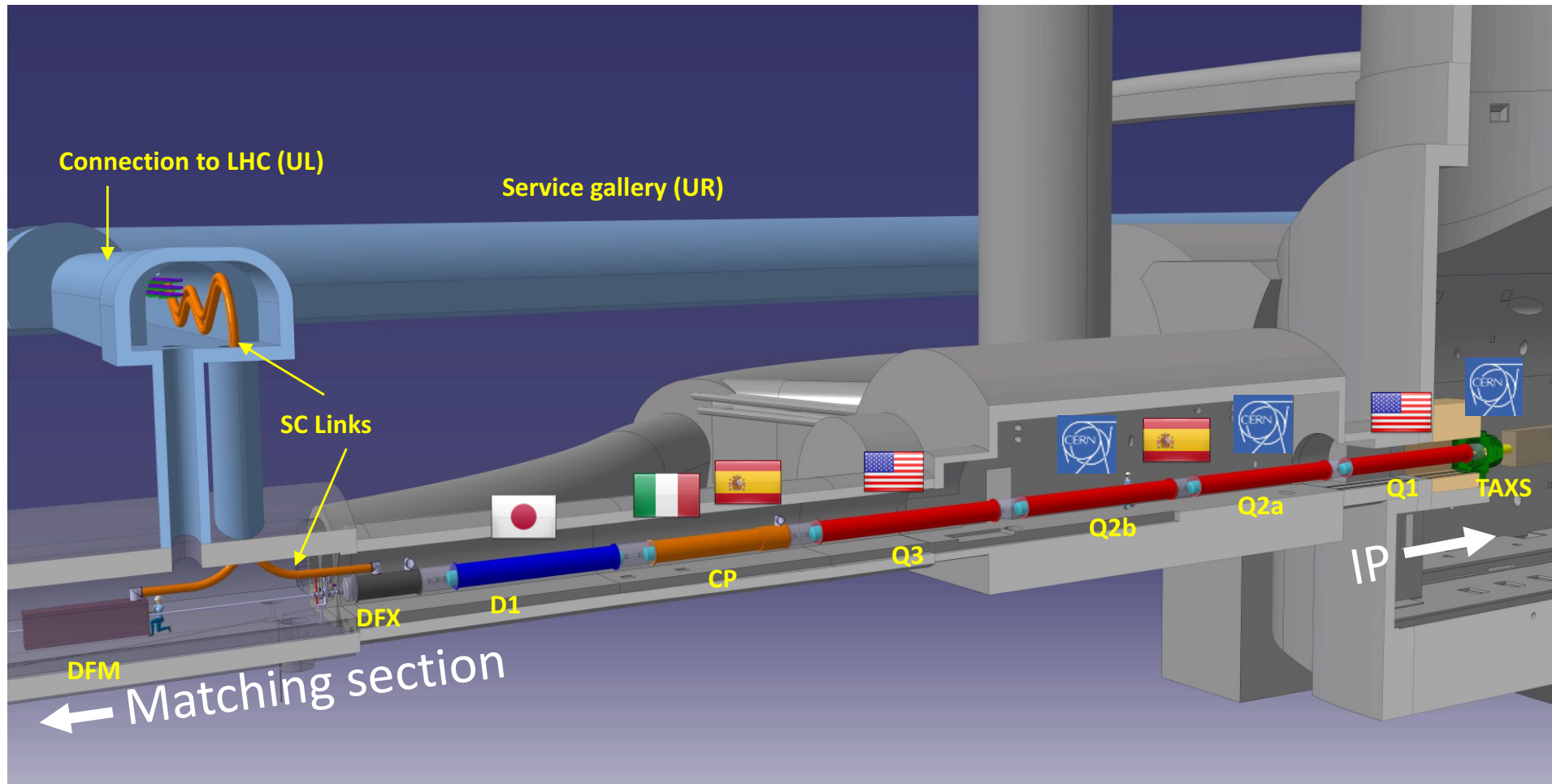
- 2011年HL-LHC概念設計、機器開発： EU-FP7 “HiLumi LHC Design Study” (CERN)
- CERNを中核として、欧州、米国(US-LARP)、日本 (KEK)の国際協力
 - KEKの参加： ATLAS実験の高度化への貢献(ビーム物理、磁石、クラブ空洞、ビーム診断)
- HL-LHCと並行して、入射器アップグレードプロジェクト“LIU”も進展中
 - KEK (J-PARC)の参加: wideband cavity using “FINEMET-FT3L” alloy, solid state amp.

Contents

- CERN-LHC
 - 概要、経緯
 - 日本の貢献
 - 運転状況
- LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- 将来計画: Future Circular Collider (FCC)
- まとめ

Inner Triplet System at IP for HL-LHC

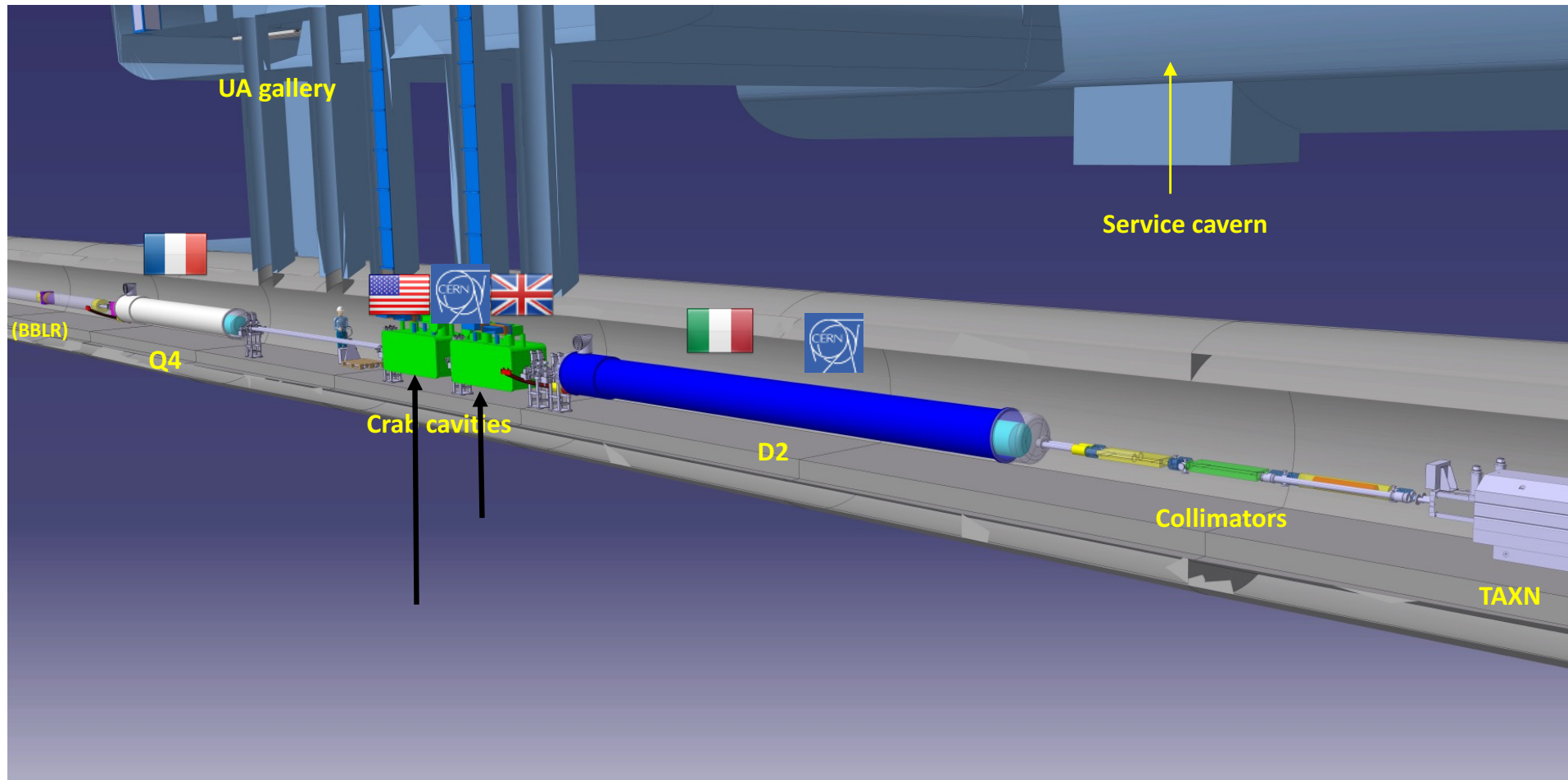
L. Rossi



- Insertion regions for IP1 & 5 will be totally replaced for upgrade.
- New magnet system (IT Quad., D1, Correctors) 70mm → 150mm
- **New Technology: Nb₃Sn Quad., SC Crab-cavities**

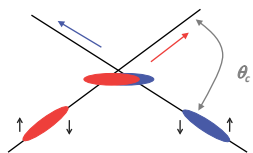
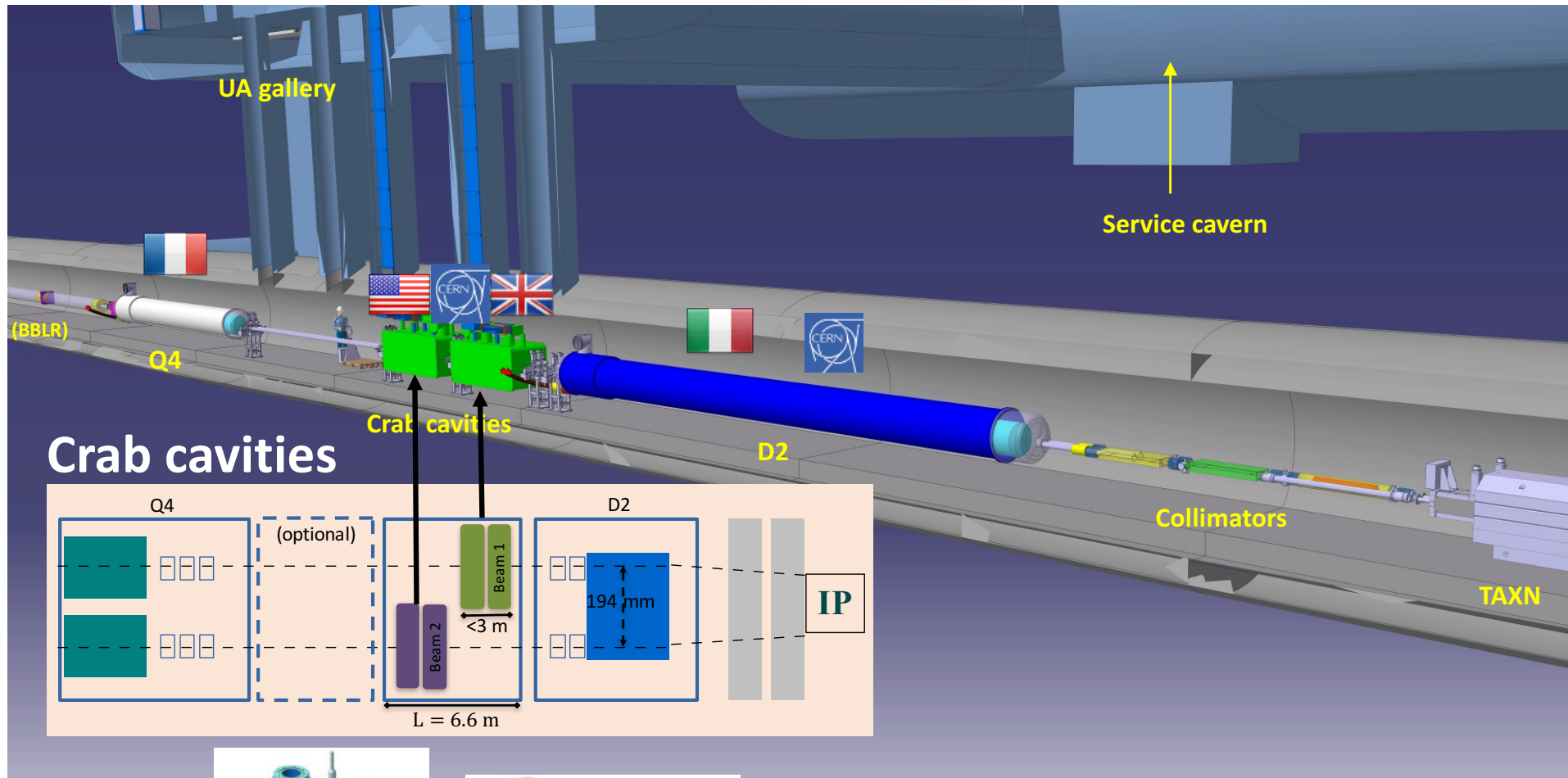
IR Matching Section at IP for HL-LHC

L. Rossi
R. Calaga



IR Matching Section at IP for HL-LHC

L. Rossi
R. Calaga



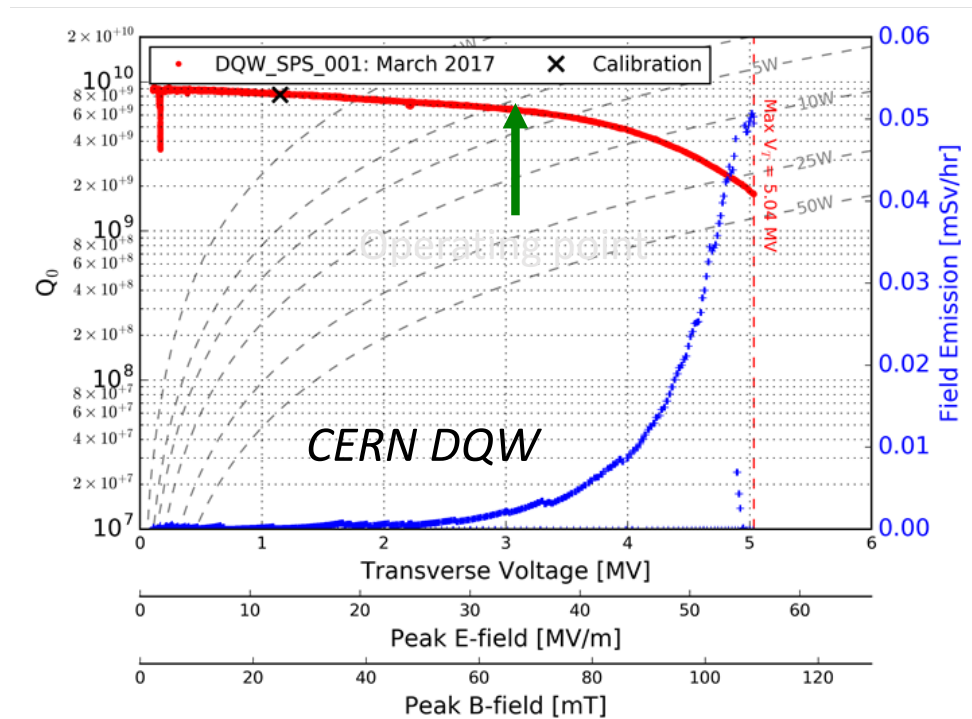
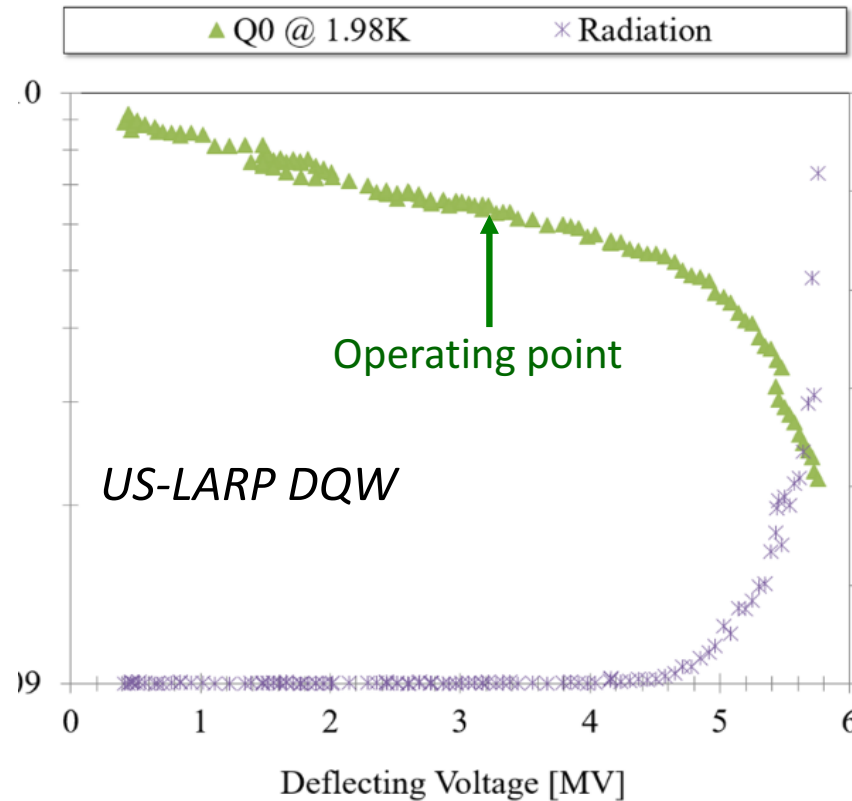
Double Quarter Wave (DQW) cavity at ATLAS (V)



RF-Dipole (RFD) cavity at CMS (H)

- Voltage = 3.4 MV /cavity (2 cavities /beam /IP side) – 16 total
- Frequency = 400.79 MHz
- $Q_{ext} = 5 \times 10^5$, $Q_0 \approx 10^{10}$
- RF power source = 80 kW (SPS \leq 40 kW)
- Cavity tuning = ± 100 kHz (LFD \sim 0.5 kHz)
- Operating temperature = 2.0 K

Superconducting RF Crab Cavity First Prototypes



February 2017 three (naked) Crab Cavities were tested: all went well beyond the operating voltage of 3.4 MV

- One US-LARP DQW (tested at JLab) went up to 5.4 MV
- One US-LARP RFD (tested at Jlab) reached 4.03 MV.
- One CERN DQW (test at SM18) went up to 5.04 MV

Good results for the CC testing in the SPS in 2018

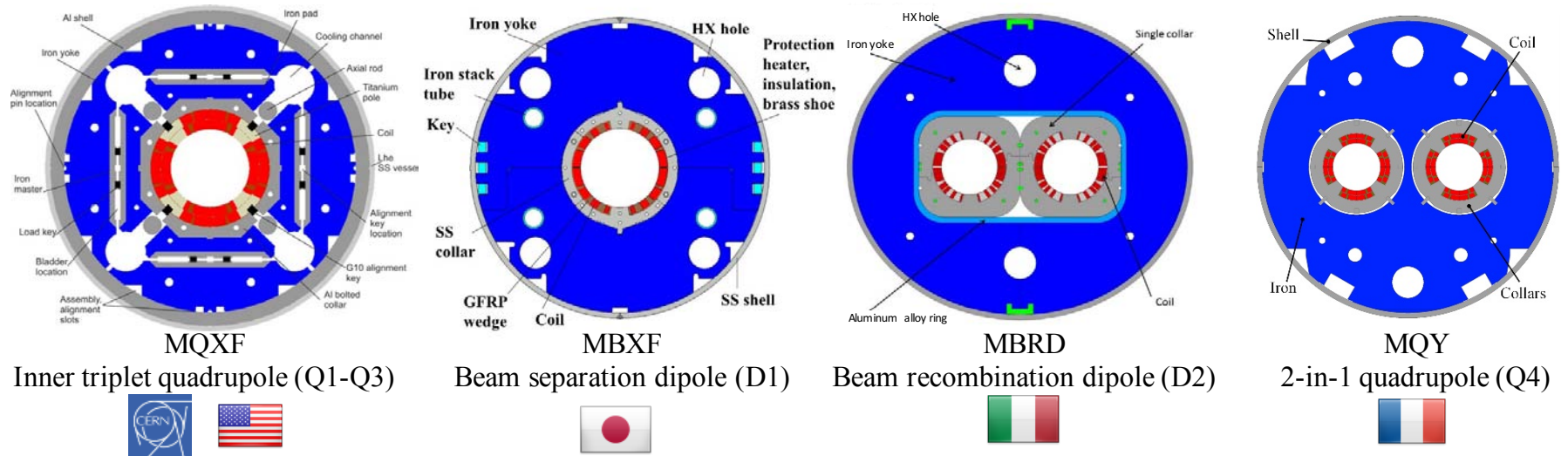


Cross Sections of IR Magnets

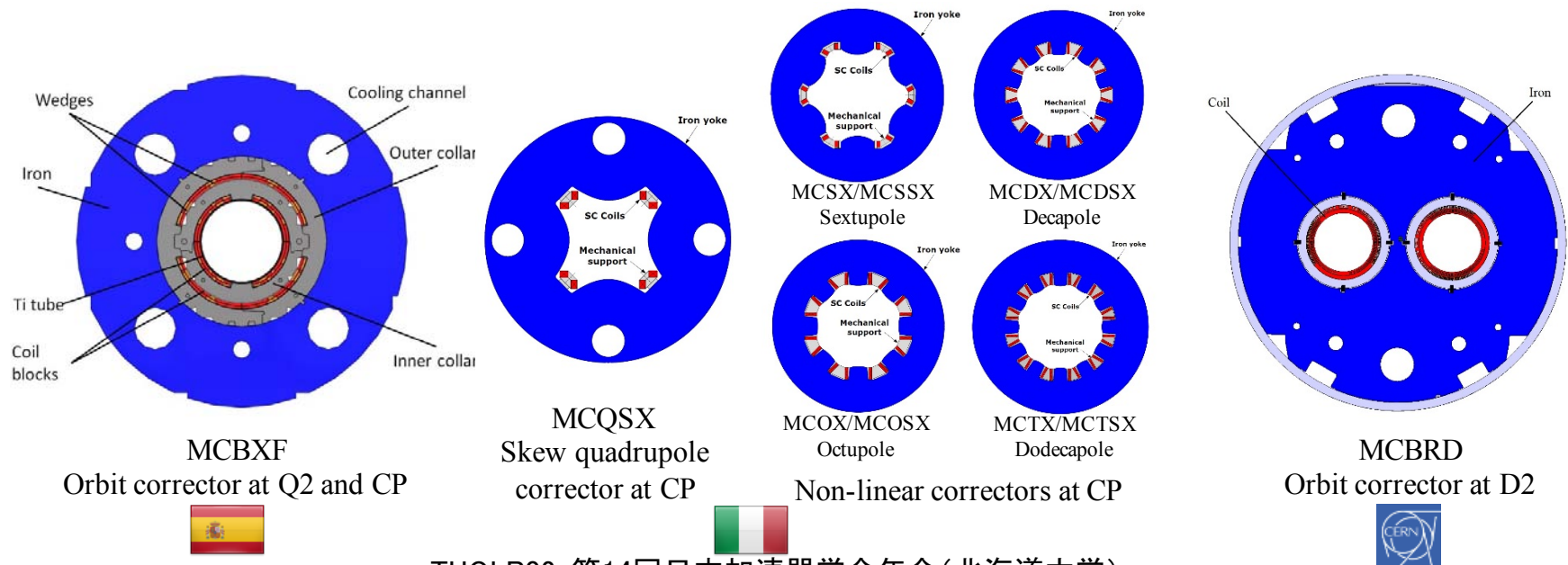
- 11 cross sections, 92 magnets (+spare)
- $L_{\text{mech.}}$: 0.1 m to 8 m
- Development programs for all model magnets are underway.

Cross-sections in scale

Main Magnets

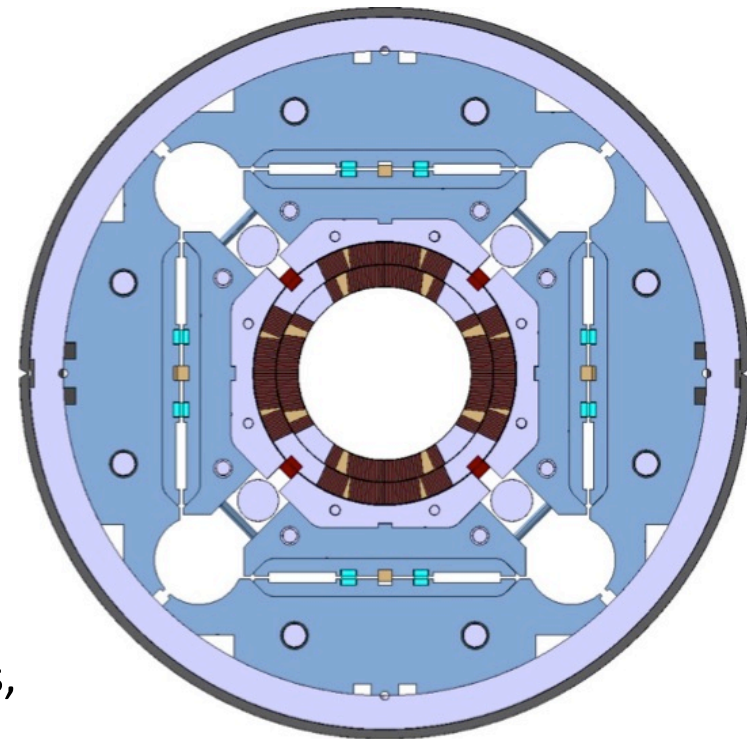
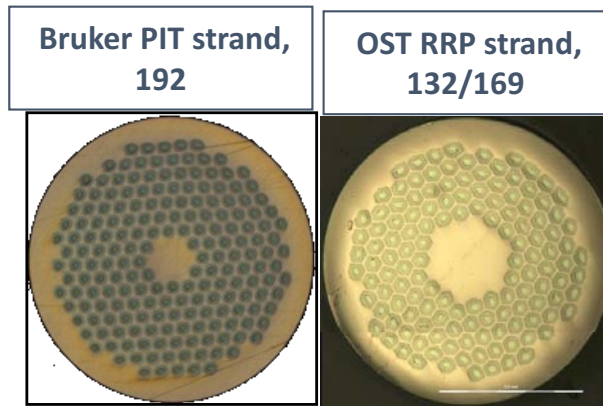


Corrector Magnets



Nb₃Sn Inner Triplet Quad.: MQXF

Paolo Ferracin

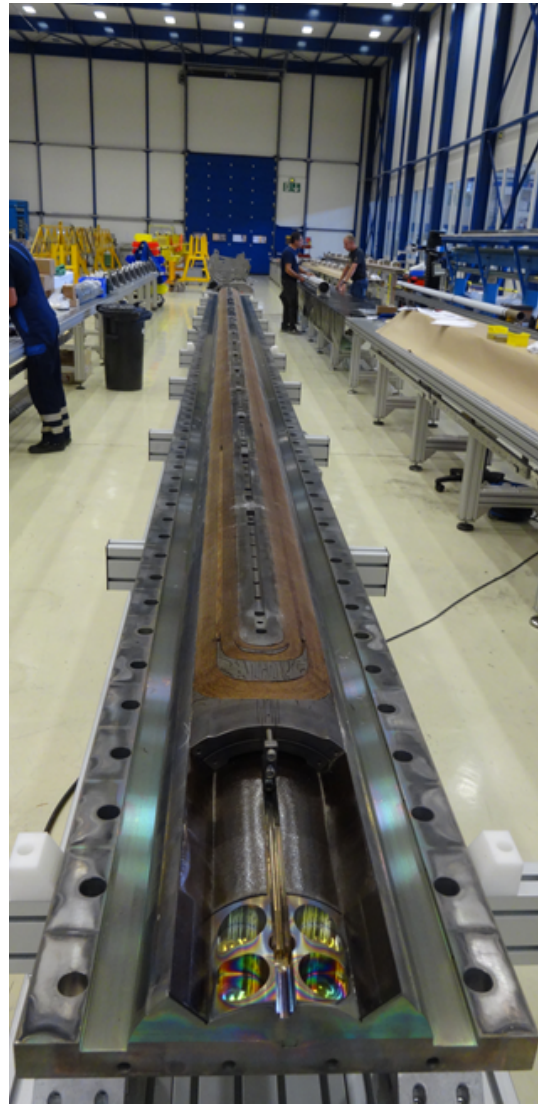


- First demonstration of Nb₃Sn accelerator magnet generating a field > 10 T
 - Important milestone toward High Energy upgrades of LHC in future
 - Difficulty: heat treatment at 660 °C, brittleness, stress sensitivity, flux jump
- Target: 132.6 T/m
 - 150 mm coil aperture, 11.4 T B_{peak}
- Q1/Q3 (by US-HiLumi Project)
 - 2 magnets MQXFA with 4.2 m
- Q2a/Q2b (by CERN)
 - 1 magnet MQXFB with 7.15 m
- Different lengths, same design



MQXF: CERN Prototype Program

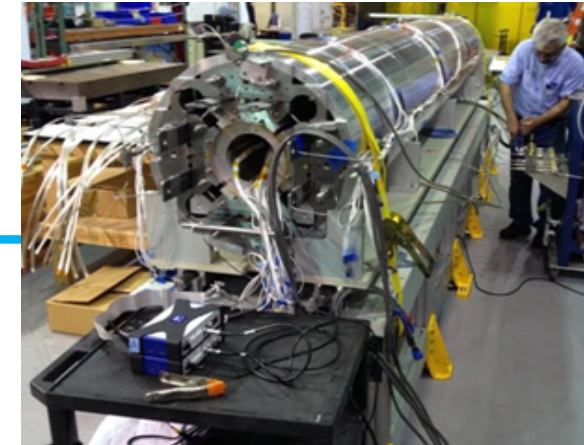
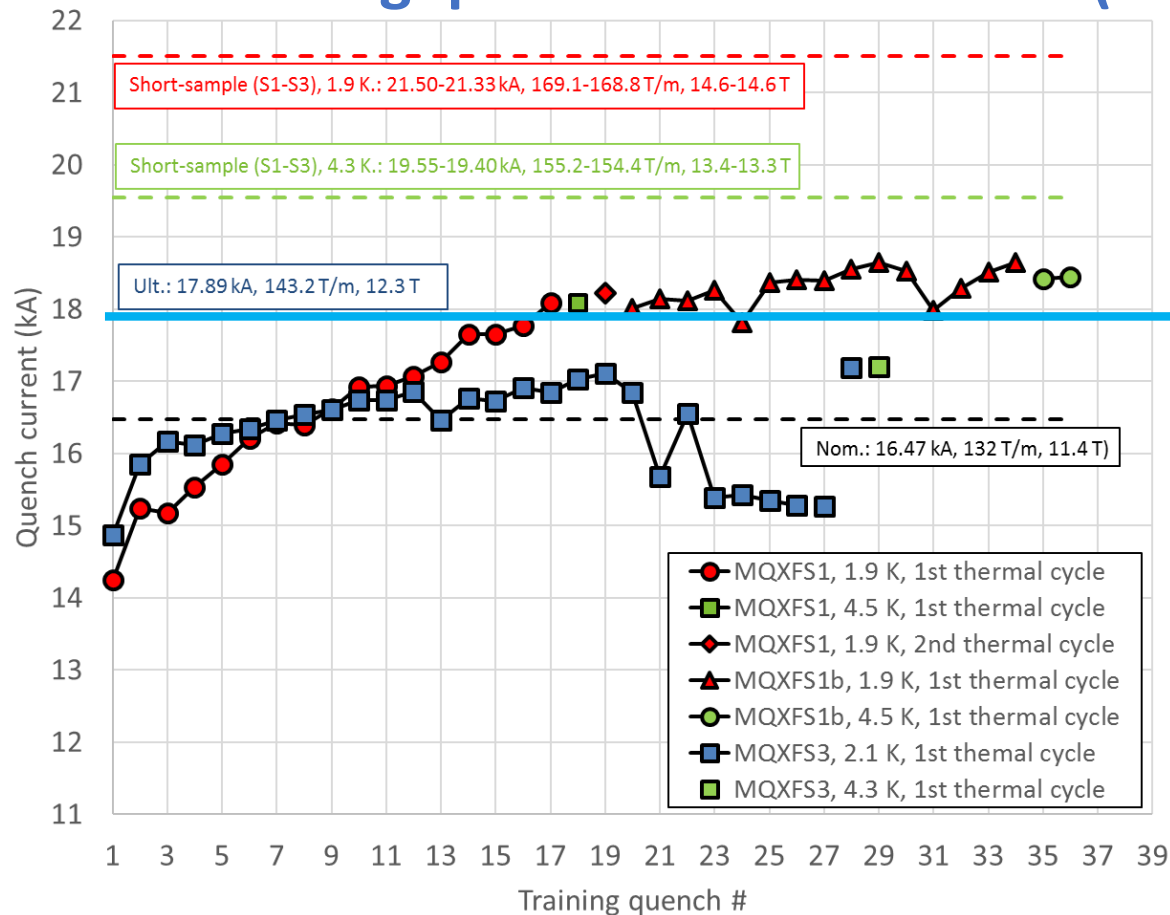
G. Ambrosio, P. Ferracin



MQXF: 1.5 m Short Models

G.L. Sabbi, H. Bajas

Training quenches of models 01 (01b) & 03



- So far, two short model (1.5 m long) magnets completed.
 - MBXFS01b: training behavior looks good.
 - MBXFS03: Not reaching to acceptance criteria.
 - Good agreement with expected field quality in terms of saturation, allowed harmonics and persistent currents.
- In total, 6 short models will be developed until 2018.

MQXF: 1.5 m Short Models

S. Izquierdo Bermudez

Average harmonics in the straight section at the nominal current

$R_{\text{ref}}=50\text{mm}$

n	MQXFS1a		MQXFS3a	
	b_n	a_n	b_n	a_n
3	-4.21	3.29	-1.02	-1.31
4	0.32	-6.49	-0.86	3.72
5	2.76	-0.87	-3.23	-1.70
6	0.95	0.52	-1.83	0.87
7	0.18	0.32	0.35	-0.27
8	0.25	-0.65	-0.16	0.33
9	0.22	0.33	-0.17	-0.11
10	-0.51	0.16	-0.30	-0.02

*Values are normalized w.r.t B_2 with a scale factor of 10^4 .

- Good agreement with expected field quality in terms of saturation, allowed harmonics and persistent currents.
- Some of the measured geometric field errors are above correction capabilities.

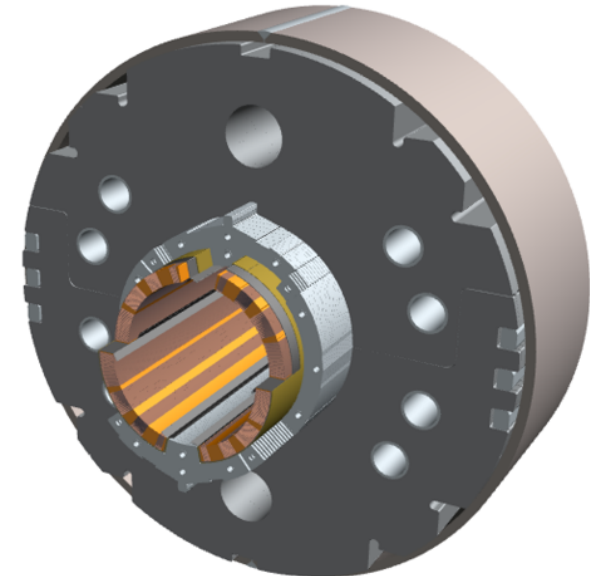
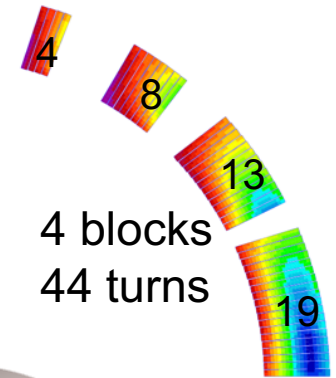
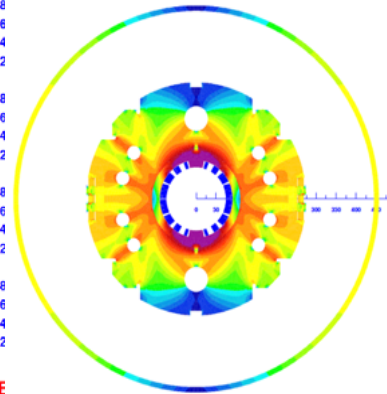
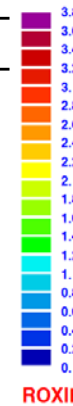
Contents

- CERN-LHC
 - 概要、経緯
 - 日本の貢献
 - 運転状況
- LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- 将来計画: Future Circular Collider (FCC)
- まとめ

HL-LHC Beam Separation Dipole (D1)



	A series production	2 m model
Coil aperture	150 mm	
Field integral	35 T m	9.8 T m
Nominal field	5.57 T	
Peak field	6.44 T (SS), 6.56 T (coil end)	
Operating current	12.0 kA	
Operating temperature	1.9 K	
Field quality	10^{-4} w.r.t B_1 ($R_{ref}=50$ mm)	
Load line ratio	75.4% (SS), 76.6% (coil end) at 1.9 K	
Differential inductance	4.0 mH/m	
Conductor	Nb-Ti: LHC-MB outer cable	
Stored energy	340 kJ/m	
Magnetic length	6.33 m	1.73 m
Heat load	135 W (Magnet total) 2 mW/cm ³ (Coil peak)	
Radiation dose	> 25 MGy	



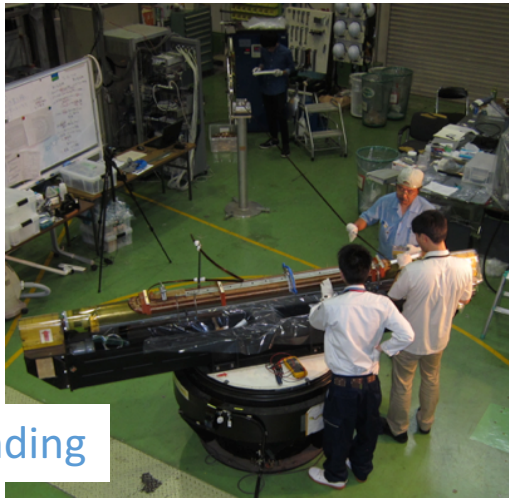
Technical challenges

- **Large aperture**: Management of coil size and pre-stress.
- **Radiation resistance**: Radiation resistant material for coil parts. Cooling capability.
- **Iron saturation**: Good field quality from injection to nominal current.

Plan of Japanese in-kind contribution (the budget is not approved yet.)

- Full scale prototype (magnet in cryostat): 1
- Series production: 6

Development of the 1st D1 2m model at KEK



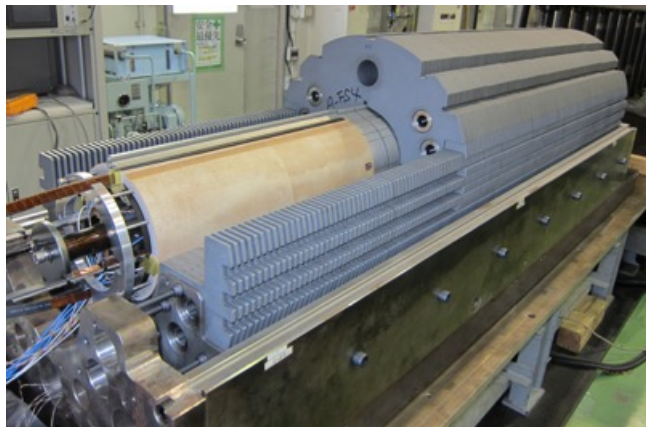
Coil winding



Curing



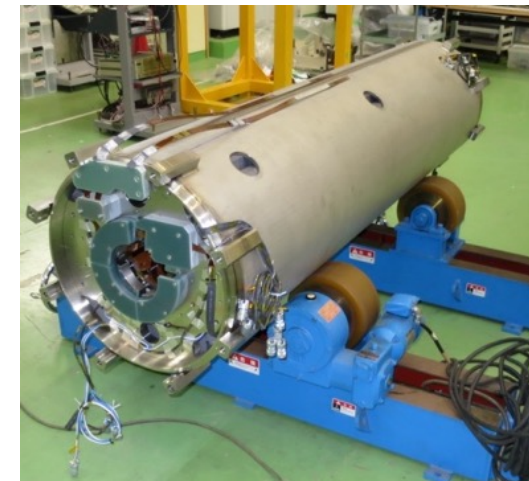
Collaring



Yoking



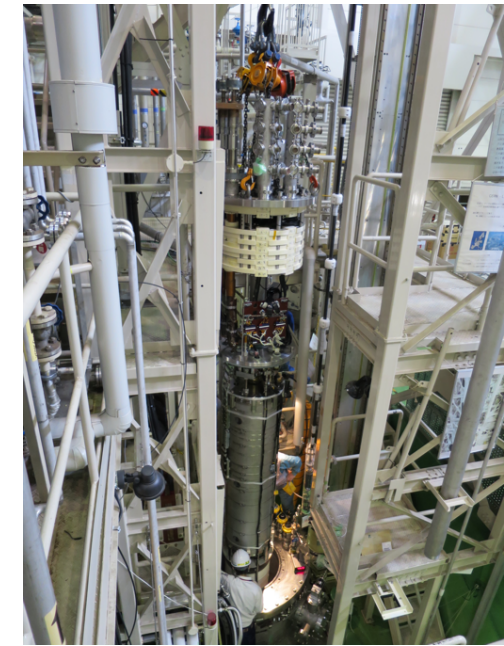
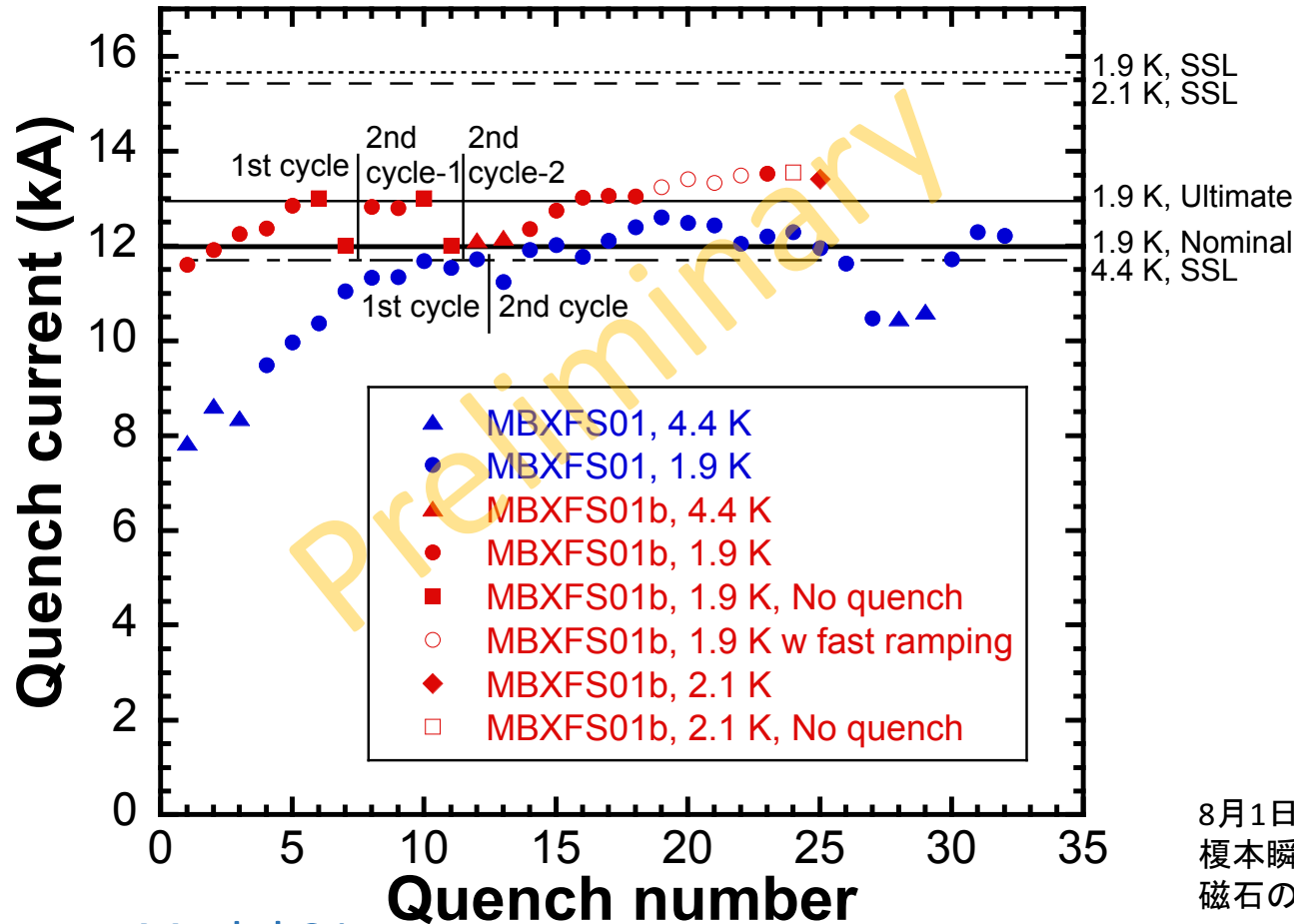
Shell welding



Completed magnet

Some minor technical issues found. But they were basically solved, or improvement will be applied to the 2nd model.

Quench Performance: D1 2m Models 01 & 01b



8月1日『電磁石と電源2』

榎本瞬: TUOM08, LHC高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(5) - 改造したモデル磁石の励磁試験結果

- Model 01

- Unsatisfactory quench behavior due to insufficient preload at assembly.



Decision to reassemble the model 01 with increasing preload on the SC coil.

- Model 01b

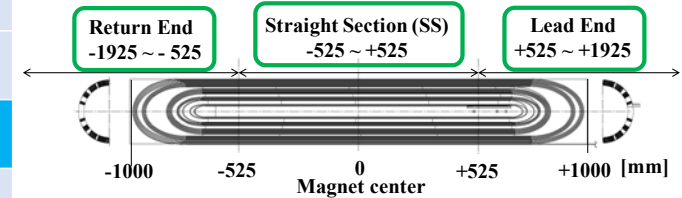
- Significant improvement of quench behavior: reaching to the ultimate at 6th ramp in the 1st test cycle.
 - Good training memory after full thermal cycle.

MFM Results of Model 01



Field integral at 10kA

n	RE		SS		LE		Total	
	\overline{b}_n	\overline{a}_n	\overline{b}_n	\overline{a}_n	\overline{b}_n	\overline{a}_n	\overline{b}_n	\overline{a}_n
1	1937.51 (1965.25)	2.53 (0.00)	6031.67 (6080.50)	-0.46 (0.27)	2030.82 (1954.25)	-28.55 (-17.11)	10000.00 (10000.00)	-26.47 (-16.80)
2	0.25 (0.00)	-2.50 (0.00)	-0.36 (0.00)	-0.23 (0.00)	0.25 (0.00)	-0.93 (0.00)	-0.17 (0.00)	-3.67 (0.00)
3	-9.26 (-7.70)	-0.24 (0.00)	18.76 (21.41)	0.29 (0.13)	-5.19 (-5.50)	6.74 (5.74)	4.30 (8.21)	6.78 (5.88)
4	0.21 (0.00)	-0.26 (0.00)	0.00 (0.00)	0.19 (0.00)	0.07 (0.00)	0.23 (0.00)	0.28 (0.00)	0.17 (0.00)
5	-1.12 (-1.73)	-0.07 (0.00)	-1.14 (-0.66)	0.05 (-0.02)	1.42 (-0.08)	-0.52 (-0.52)	-0.84 (-2.46)	-0.54 (-0.54)
6	0.14 (0.00)	-0.13 (0.00)	-0.04 (0.00)	0.03 (0.00)	-0.04 (0.00)	-0.02 (0.00)	0.06 (0.00)	-0.12 (0.00)
7	-1.34 (-1.49)	-0.01 (0.00)	0.18 (0.20)	0.08 (0.03)	-0.62 (-0.70)	0.36 (0.39)	-1.78 (-1.99)	0.43 (0.41)
8	0.12 (0.00)	-0.12 (0.00)	-0.10 (0.00)	-0.08 (0.00)	-0.19 (0.00)	0.07 (0.00)	-0.18 (0.00)	-0.12 (0.00)
9	-1.16 (-1.32)	-0.06 (0.00)	-0.02 (0.09)	-0.09 (-0.01)	-0.92 (-1.01)	0.00 (-0.15)	-2.09 (-2.23)	-0.16 (-0.16)
10	0.06 (0.00)	-0.05 (0.00)	-0.08 (0.00)	-0.03 (0.00)	-0.08 (0.00)	0.02 (0.00)	-0.10 (-0.81)	-0.06 (0.00)



$$\overline{b}_n(I) = \frac{\int B_n(I) dz}{\int B_1(I) dz} \times 10^4$$

Measurement
(ROXIE cal.)

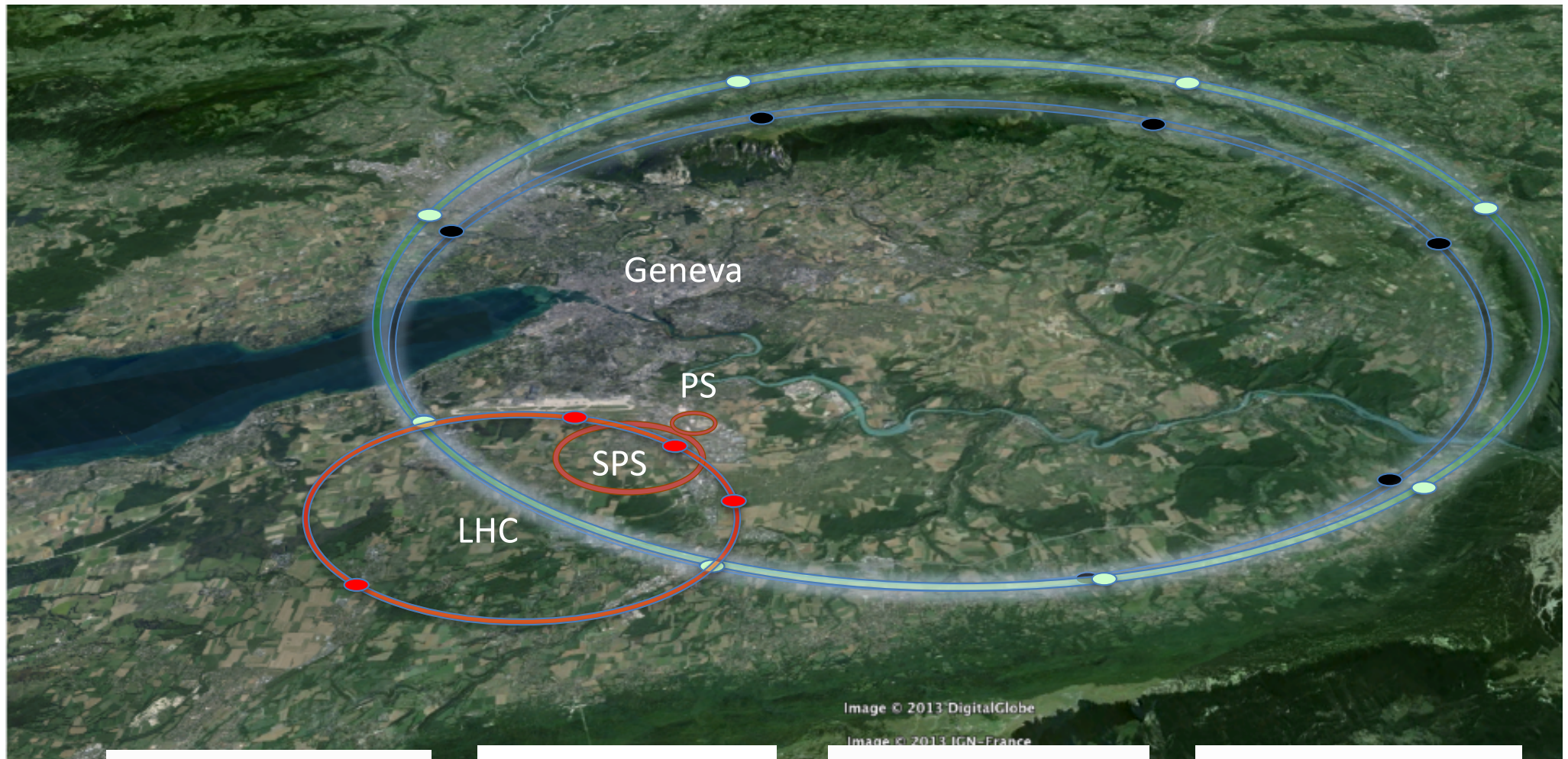
- **ROXIE3D calculations generally agree with the measurement.**
 - Need improvement of ROXIE models for b_3 and b_5 .
- Skew and un-allowed multipoles are sufficiently small.

Contents

- CERN-LHC
 - 概要、経緯
 - 日本の貢献
 - 運転状況
- LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- **将来計画: Future Circular Collider (FCC)**
- まとめ

Beyond the LHC: the FCCs

Luca Bottura



LHC

27 km, 8.33 T
14 TeV (c.o.m.)
1300 tons NbTi
0.2 tons HTS

HE-LHC

27 km, **20 T**
33 TeV (c.o.m.)
3000 tons LTS
700 tons HTS

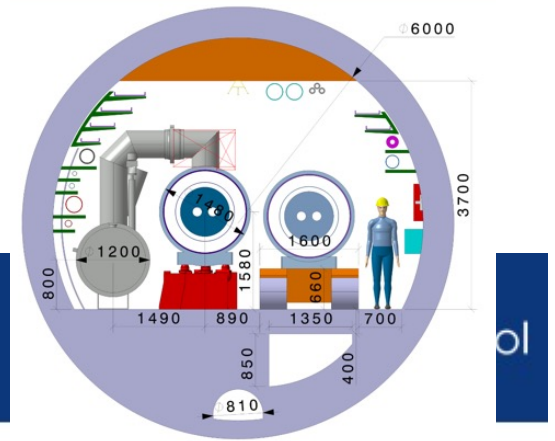
FCC-hh

80 km, **20 T**
100 TeV (c.o.m.)
9000 tons LTS
2000 tons HTS

FCC-ee

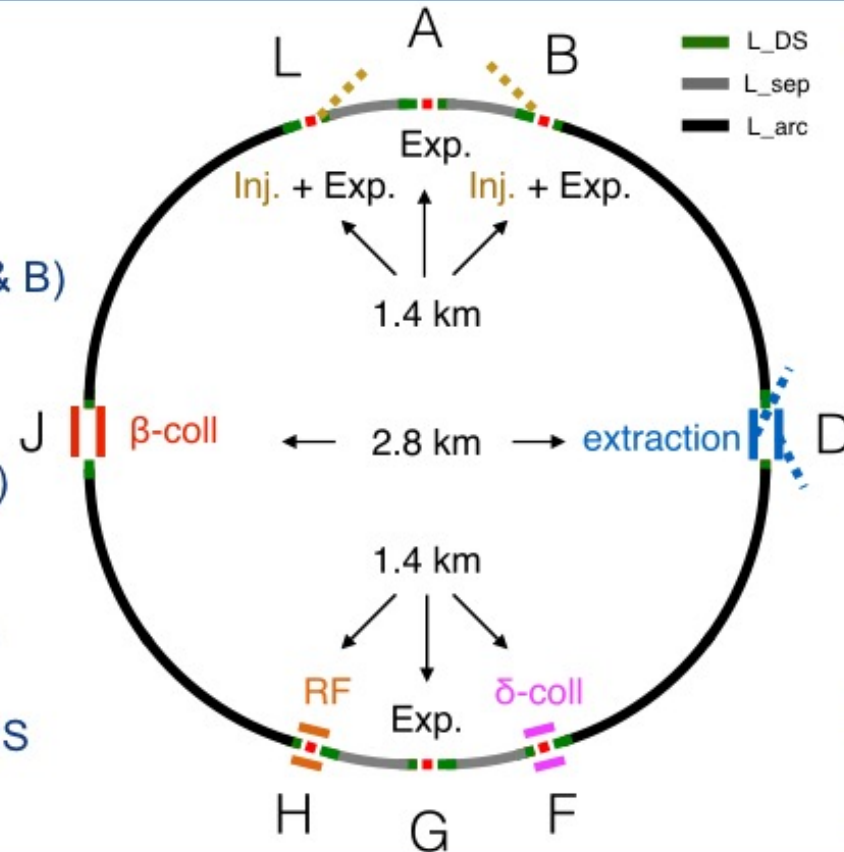
100 km, **16 T**
100 TeV (c.o.m.)
6000 tons Nb₃Sn
3000 tons Nb-Ti

加速器



FCC-hh new layout

- Two high-luminosity experiments (A & G)
- Two other experiments combined with injection (L & B)
- Two collimation insertions
 - Betatron cleaning (J)
 - Momentum cleaning (F)
- Extraction insertion (D)
- Clean insertion with RF (H)
- Compatible with LHC or SPS as injector



New features:

- Overall length 97.75 km
- Economy length 2.25 km
- Injections upstream side of experiments
- Avoids mixing of extraction region and high-radiation collimation areas

Taking this layout as fixed
(for CDR preparation)



FCC-pp collider parameters

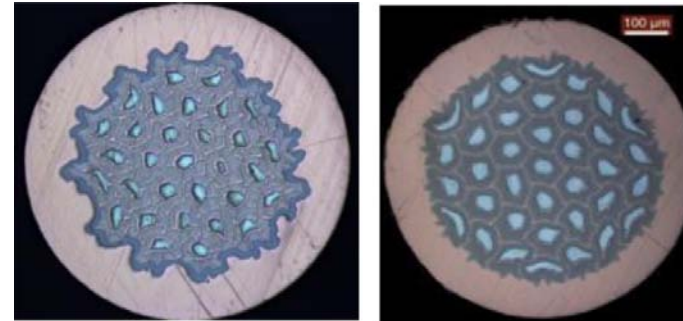
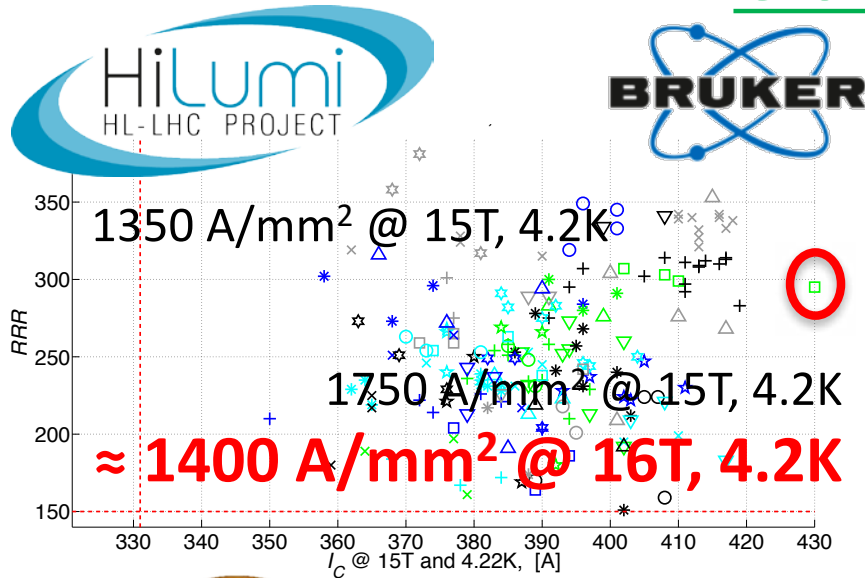


parameter	FCC-hh		HE-LHC	HL-LHC	LHC
collision energy cms [TeV]	100		27	14	14
dipole field [T]	16		16	8.33	8.33
circumference [km]	97.75		26.7	26.7	26.7
beam current [A]	0.5		1.12	1.12	0.58
bunch intensity [10^{11}]	1	1 (0.2)	2.2 (0.44)	2.2	1.15
bunch spacing [ns]	25	25 (5)	25 (5)	25	25
synchr. rad. power / ring [kW]	2400		101	7.3	3.6
SR power / length [W/m/ap.]	28.4		4.6	0.33	0.17
long. emit. damping time [h]	0.54		1.8	12.9	12.9
beta* [m]	1.1	0.3	0.25	0.20	0.55
normalized emittance [μm]	2.2 (0.4)		2.5 (0.5)	2.5	3.75
peak luminosity [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	5	30	25	5	1
events/bunch crossing	170	1k (200)	~800 (160)	135	27
stored energy/beam [GJ]	8.4		1.3	0.7	0.36

Conductor Development: 1500A/mm² @ 16T

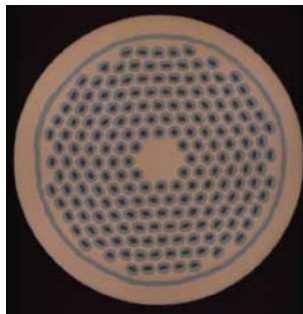
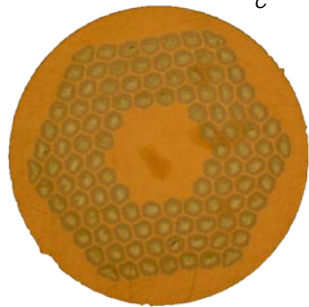
Global effort

Luca Bottura



2850 A/mm² @ 12T, 4.2K

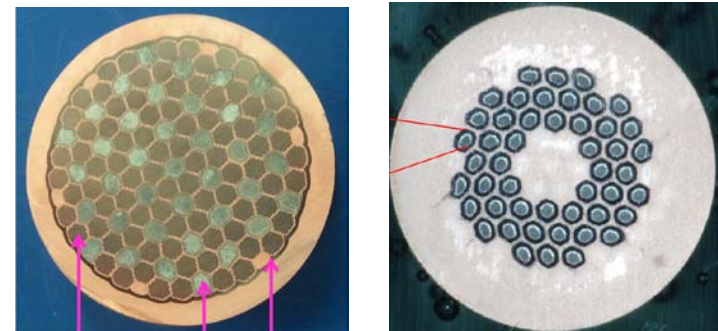
≈ 1250 A/mm² @ 16T, 4.2K



1274 A/mm² @ 15T, 4.2K

≈ 1000 A/mm² @ 16T, 4.2K

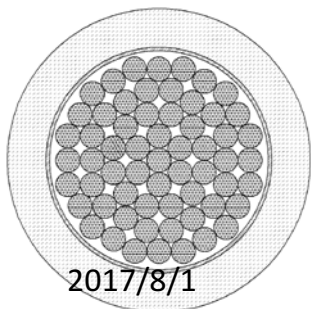
≈ 950 A/mm² @ 16T, 4.2K



JASTEC SUPERCONDUCTOR

FURUKAWA ELECTRIC

KEK、東北大、東海大



NFRI National Fusion Research Institute

Kiswire KAT

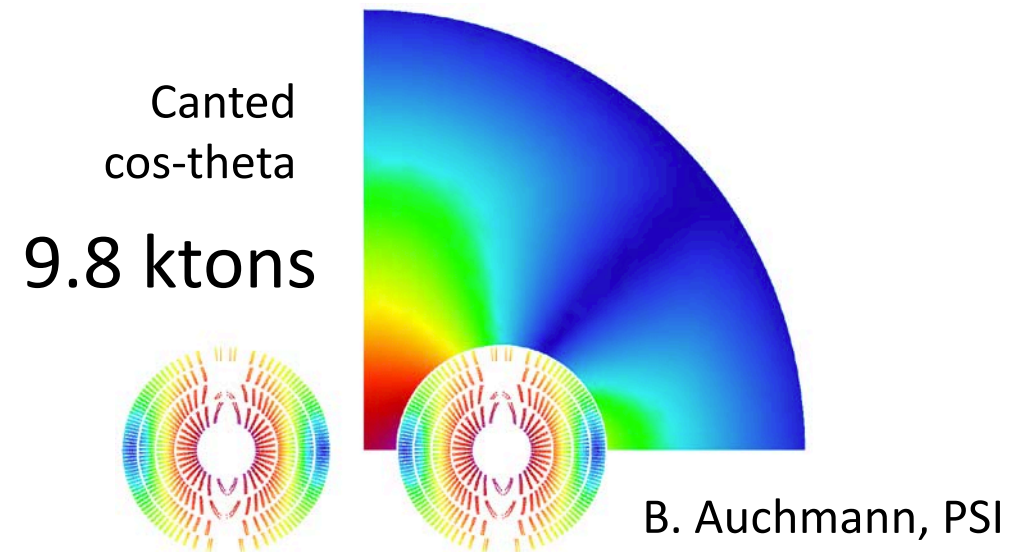
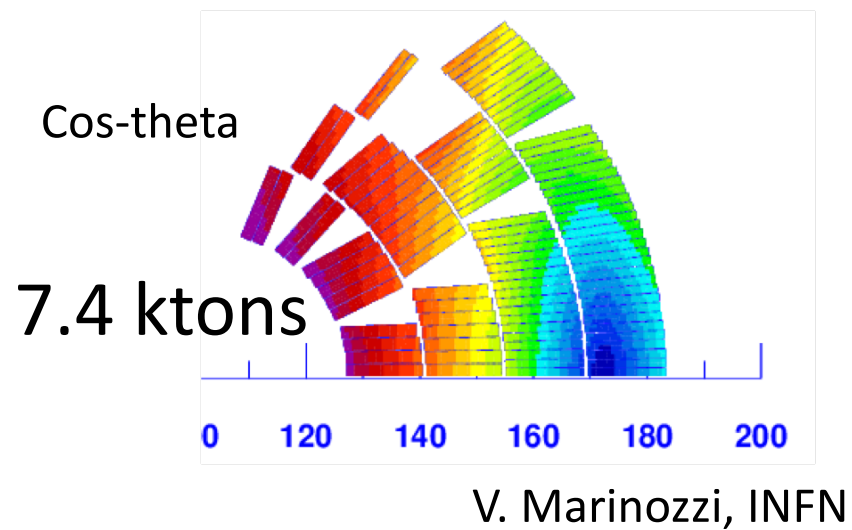
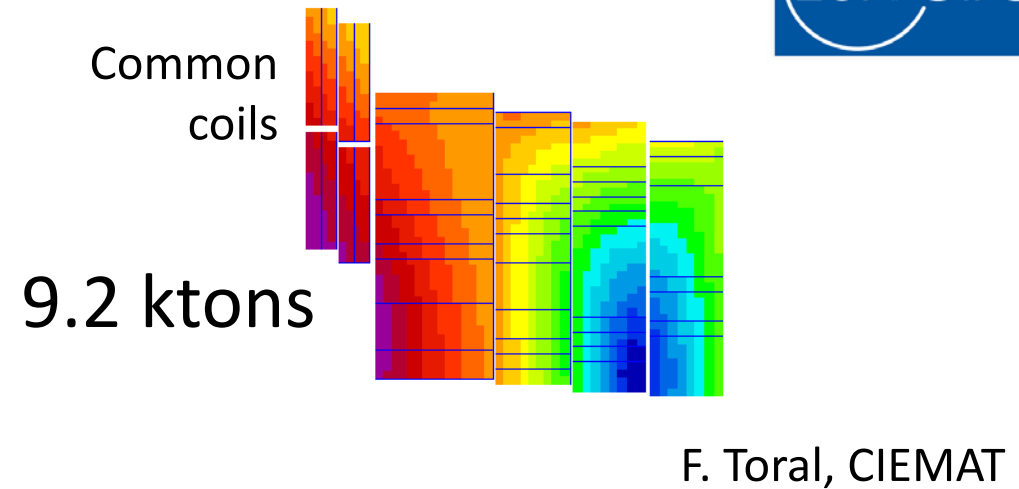
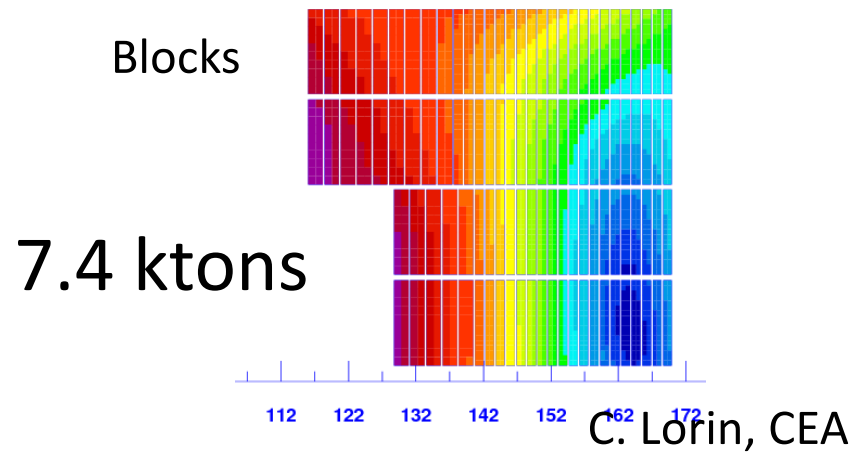


Western Superconducting Technologies Co., Ltd.

2017/8/1

TUOLP02, 第14回日本加速器学会年会(北海道大学)

16 T Dipole Design



- **All designs stable and optimized**
 - (recall initial estimate of 9000 tons)
- Model magnet development from 2018

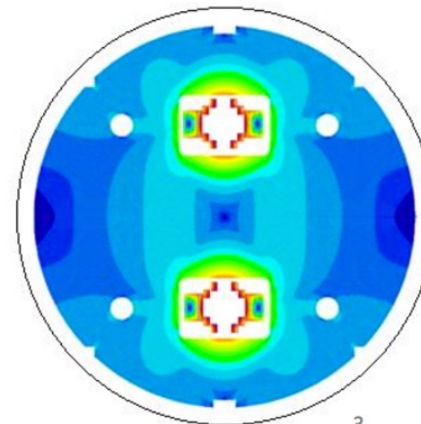
Efforts in US and China

Luca Bottura

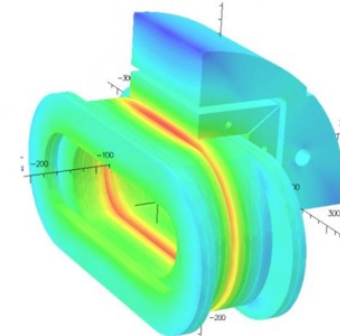
- US-MDP (2017-2019)
- HTS Development (Bi2212, REBCO)
- 15 T $\cos\theta$ dipole (Fermilab)
- 10 T CCT dipole (LBNL)

- Magnet R&D for SPPC in China
- 12 T Common coil with Iron-based HTS !!

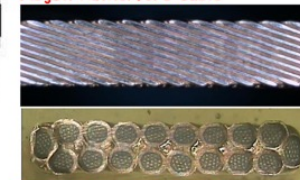
Conceptual design of the SPPC 12-T magnet with IBS and common coil configuration



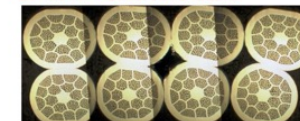
Significant engagement in HFM technology



Nb₃Sn Rutherford cable



Bi-2212 Rutherford cable



Contents

- CERN-LHC
 - 概要、経緯
 - 日本の貢献
 - 運転状況
- LHC高輝度化アップグレード (High Luminosity LHC Upgrade, HL-LHC)
 - 概要
 - 技術開発: 超伝導クラブ空洞、 Nb_3Sn 四極磁石
 - 日本の貢献
- 将来計画: Future Circular Collider (FCC)
- **まとめ**

まとめ

- 2016年のLHC運転は、非常に順調
 - 40 fb^{-1} @ 13 TeV , $1.4 \text{ e}34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 金属片による地絡、UFO、電子雲、IT Quadの冷凍能力などの諸問題. . .
- 2017年の運転計画
 - 目標: 45 fb^{-1} @ 13 TeV w/ BCMS beam, β^* of 40cm, 運転効率50 %以上.
 - 磁石トレーニングに時間が掛かるため、2018年までのRun2は、陽子エネルギー6.5TeVで運転。
 - ピークルミノシティは、最終ビーム収束磁石へのビーム入熱と関連するため、 $1.7 \text{ e}34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度に制限される見込み
- CERNを中心とする国際協力により、LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC)に向けた概念設計が進められてきた。2016年からは徐々に『建設』段階に移行。
 - $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, 250-300 $\text{fb}^{-1}/\text{year}$, 3000 fb^{-1}
 - 衝突点システム入れ替え工事はLS3(2024年～)。物理実験は2026年～2037年？
- HL-LHC向け各種機器開発や設計研究が進行中
 - ハイライトは、 Nb_3Sn 高磁場四極磁石(加速器初)とクラブ空洞(陽子ビーム初)
 - 放射線、熱負荷が増大するための対策が必要: 冷凍機増設、新トンネル建設、超伝導バスライン開発、など。
 - KEKも参加: ビーム物理、磁石、クラブ空洞、ビーム診断、ファインメット空洞(入射器)
 - 大口径ビーム分離双極磁石(MBXF for D1)を担当。2mモデル磁石を所内開発。
- さらに将来のエネルギーフロンティア加速器(FCC-hh, 100TeV)に向けた研究開発も進められている(欧州CERN, US-Labs., 日本)。2018年までにCDRをまとめる。