

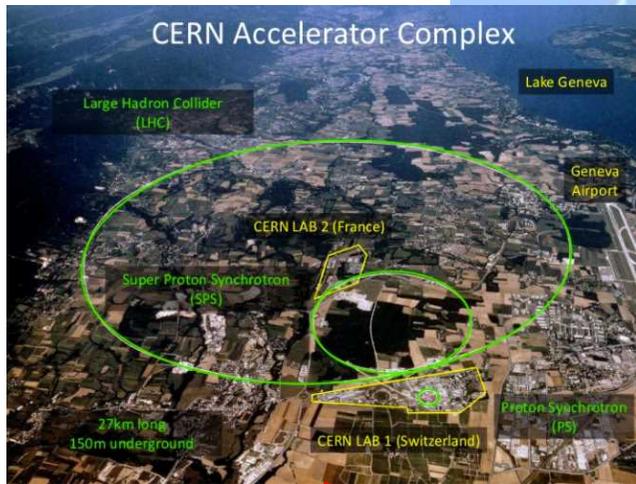
スイス・ドイツにおける大型加速器 施設を利用した素粒子物理研究

文部科学省科学官・三原智

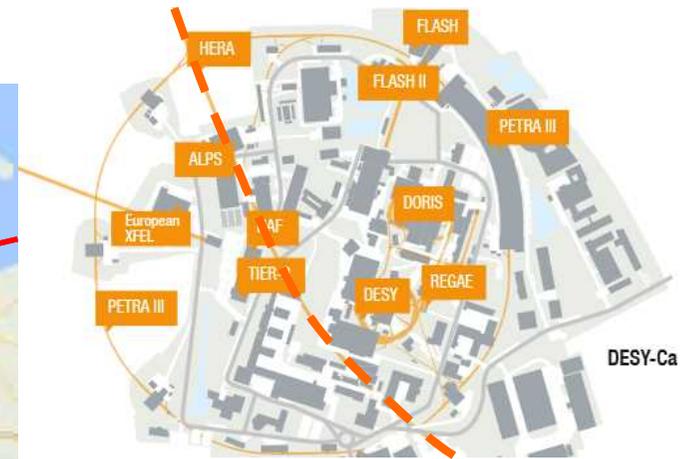
目次

- スイス・ドイツの大型加速器施設
 - DESYでの素粒子物理研究と加速器科学
 - PSIでの素粒子物理研究と加速器科学
 - まとめ
-
- 本報告は以下の方々へのインタビューに基づく
 - DESY元所長 Albrecht Wagner氏
 - PSI元所長 ETH元学長 Ralph Eichler氏
 - PSI研究者 Claude Petitjean氏
 - 東大名誉教授 山田作衛氏

欧州(スイス・ドイツ) の大型加速器施設



CERN (在スイス国際研究機関)
陽子陽子衝突型加速器 LHC



DESY (ドイツ国立の研究施設)
European XFEL
放射光施設 PETRA III



PSI (スイス国立の研究施設)
大強度陽子加速器Cyclotron
放射光施設 SLS
Swiss FEL

欧州の大型加速器施設の変遷(スイス・ドイツ)

CERN

1960

1957 600 MeV シンクロサイクロトロン (SC)
(PS以降は主に原子核研究に)
1959 28 GeV 陽子シンクロトロン(PS)

1970

1976 400 GeV スーパープロトンシンクロトロン (SPS)、周長7km、後には450GeV 運転を実現

1980

1983 陽子-反陽子衝突モードで
W、Z粒子の発見

1990

1989 LEP 電子陽電子衝突型加速器、周長27km、重心系エネルギー100GeV、後に超伝導加速空洞を導入して209GeVまでエネルギーを上げる(LEP II)



2000

2010

2010 LHC 陽子陽子衝突型加速器、周長27km、**重心系エネルギー7TeV**

2012 **Higgs粒子発見**

2015 **重心系エネルギー13TeV**

2020

高エネルギーフロンティア

DESY

1964 7.4GeV 電子シンクロトロン(DESY)

1974 重心計エネルギー7GeV 電子陽電子衝突型加速器 (DORIS)

1978 重心計エネルギー39GeV 電子陽電子衝突型加速器 (PETRA)

1990 HERA 電子(陽電子)-陽子衝突型加速器、周長6.3km、電子エネルギー27.5GeV、陽子エネルギー920GeV

1997 FLASH Free Electron Laser、全長100-260m

2001 TESLA & XFEL project



2017 European XFEL 全長3.4km 運転開始

PSI(SIN)



1974 590MeV 陽子サイクロトロン 中間子工場

1984 OPTIS陽子線治療

SINQ: スパレーション中性子源
SμS: 表面ミュオンソース

**ビームパワー(電流)を徐々に
上げ2017には1.3MW運転**

2001 Swiss Light Source(放射光)
2.4GeV 周長288m

2017 Swiss FEL 全長 740m

大強度フロンティア

DESYにおける現在の研究内容

- DESY Campus
 - 放射光施設
 - PETRA III、PETRA IV
 - FEL施設
 - FLASH
 - European XFEL
 - ALPS
 - PITZ (Zeuthen Campus)
 - REGAE

- DESY外
 - LHC
 - IceCube
 - Belle & Belle II
 - CTA
 - ILC

素粒子物理研究はDESY外で行われているが、加速器建設運転の技術は所内で維持



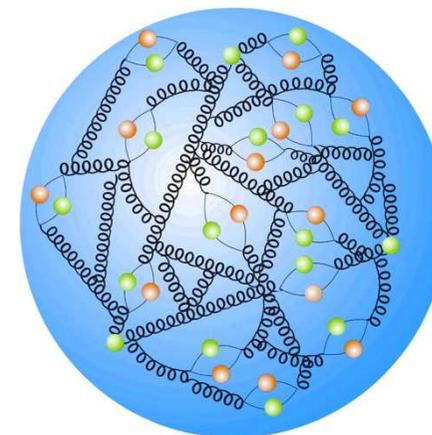
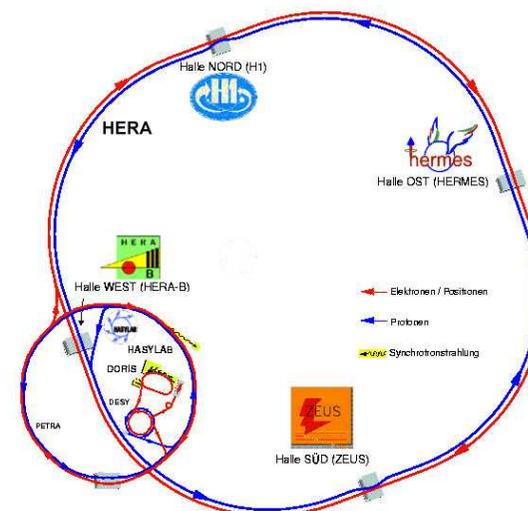
DESYにおける素粒子物理研究と加速器科学

- ドイツ国立の研究所 年間予算 231M€
 - 加速器科学、フotonサイエンス、素粒子物理学研究を推進
- CERN大型計画との関係: CERN、DESYでどのような加速器を建設して素粒子研究を進めるかに関しては、相補的な関係を維持しつつ「対立」することなく進められてきた。
 - 歴史的には、CERNは陽子加速器、DESYは電子陽電子加速器による研究が主流であった
 - CERN: SC-PS-SPS-SPPbarS、DESY: DORIS-PETRA
- 80年代にCERNがLEP(電子陽電子衝突型加速器)を始め、DESYがHERA(電子陽子衝突型加速器)を開始。その後CERNはLEPトンネルを利用してLHCを建設、DESYはそれまでHERAの入射機として使われていたPETRAリングで放射光施設(PETRA III)の運転を開始した。さらにその後はEuropean XFELの建設を開始。
 - どちらでどういう研究を進めるかは常にECFA(ICFA)での話し合いが行われてきたがECFA(ICFA)で決断が行われたわけではなく、どういう施設を建設するかはあくまで各々の研究所の決断に委ねられていた。
 - ドイツ政府は常に議論をフォローしていた。
 - DESYがHERAを開始するという最終決断は、ドイツのScience Councilでの議論を経た後、大臣が決断して最終的なプロジェクトの開始が決定した。CERNでのLEP計画の開始はCERN Councilで決定。

DESYにおける素粒子物理研究と加速器科学

- HERAプロジェクト
 - H1、Zeus、HERMESの3つの国際共同実験
 - HERA Modelによる加速器建設
 - 11カ国がHERA加速器建設の20%を負担
 - 国同士の条約を締結することなく、MoUレベルでの合意で建設
 - Scientificな面での運営は問題なかったが、Administrativeな部分でむしろ困難が多かった。
 - 運転は2007年に終了したが解析は現在も行われている
- ドイツはCERNへの貢献を行っているが、それに加えてHERAを建設するという点に関しては当然議論があったが、ローカルな技術を維持することの重要性が認識されていた。HERAプロジェクトの後にTESLA+XFELと続く展望があったこともプロジェクトが認められる大きな要因となった。
- プロジェクトの開始前に、HERAの運転終了後にはTESLA+XFELを開始するという決断が研究所により行われており、運転中からドイツScience Councilで議論が行われていた
- ドイツ国内における他分野との競合はScience Councilで議論。TESLA+XFELプロジェクトはそこでの議論でひじょうに高い評価を受けていた。
- 最終的には大臣がXFELプロジェクトのみを進めるという決断を下して現在に至っている。

電子-陽子、陽電子-陽子
衝突型加速器 HERA



The “HERA Model” of International Cooperation

HERA was to become the largest scientific project ever financed in Germany. But is a single country capable of realizing such a project alone? The German federal government had financed the construction of DESY's previous storage ring accelerator, PETRA, with the experiments being paid for by the participating institutes, both German and foreign.

The advisory committee that assessed the HERA project on behalf of the German Ministry of Research and Technology (BMFT) in the early 1980s was of the opinion that this program should be on a different footing than PETRA: “Since the construction of HERA will result in a second internationally competitive laboratory in Europe alongside CERN that will be operated on a long-term basis (something which the committee wholeheartedly recommends), it is only logical that DESY should not only be used by researchers from abroad, but that laboratories from other countries should also contribute to the construction of HERA. In its recommen-

This type of international cooperation was something completely new at the time, and it was not immediately clear if it would even be possible to obtain assistance from abroad for what was primarily a German accelerator project. The scientists at DESY – particularly the Heidelberg physics professor Volker Soergel, who became chairman of the DESY Directorate on January 1, 1981 – were now faced with the task of making foreign partners aware of HERA's scientific potential and interesting technology, as well as of



DESY Director Volker Soergel (left) welcomes Italian Prime Minister Giulio Andreotti (right) at DESY; standing behind them is Antonio Zichichi, then president of INFN.

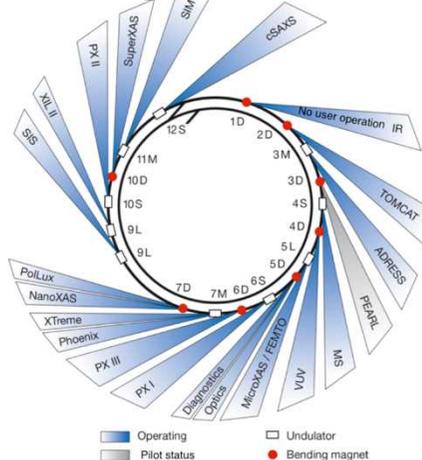
if they did not contribute anything, the whole project might not be realized. The fact that we managed to get so much support from abroad is evidence of the project's high quality.” The plan was successful, and notable foreign partners contributed materials and services without any international treaties having to be signed or government agencies having to intervene. Of course, the partners benefited as well, as the project provided them with valuable knowledge and experience – particularly with regard to the technologies employed.

The people at DESY also made extraordinary efforts to ensure that the project was completed on time and within budget. Construction of HERA began at a time when the German parliament and the Ministry of Research had decided that the 13 national research centers should reduce the size of their workforces. No exceptions were made for DESY, despite the initiation of the new project. The management of DESY therefore decided to have the HERA electron ring constructed by the team headed by Gustav-Adolf Voss, which already had experience

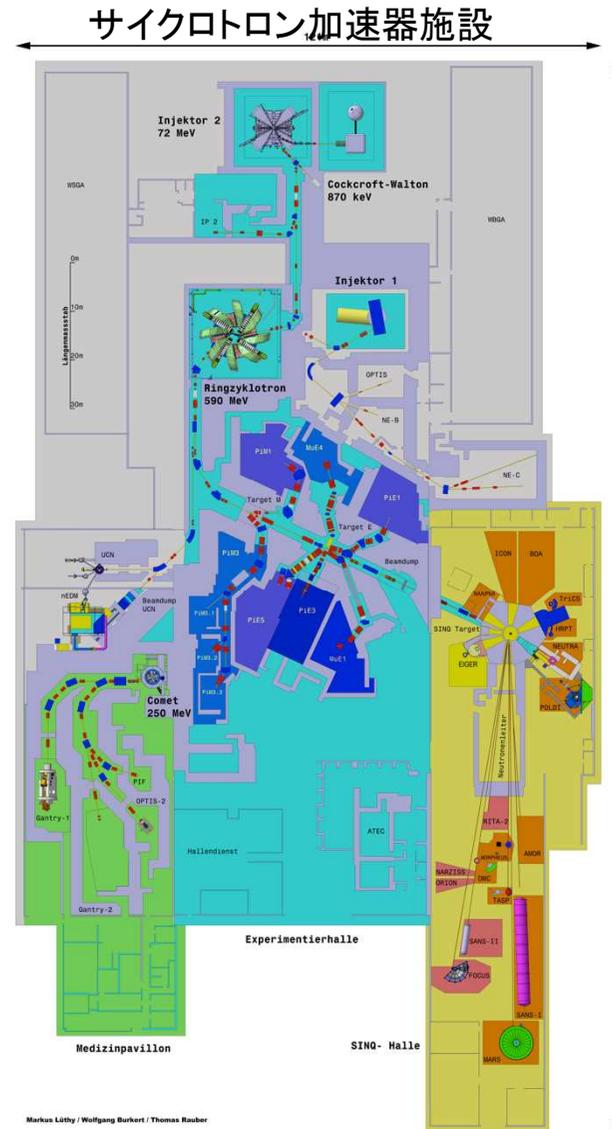
PSIにおける現在の研究内容

- サイクロトロン加速器施設
 - 素粒子実験
 - ミューオン実験
 - 中性子EDM
 - Swiss Muon Source ($S\mu S$)
 - Swiss Spallation Neutron Source (SINQ)
- 放射光施設 SLS
- Swiss FEL
- 陽子線治療
- 加速器を使わない研究
 - 再生エネルギー研究、原子力等

Swiss Light Source



Swiss FEL

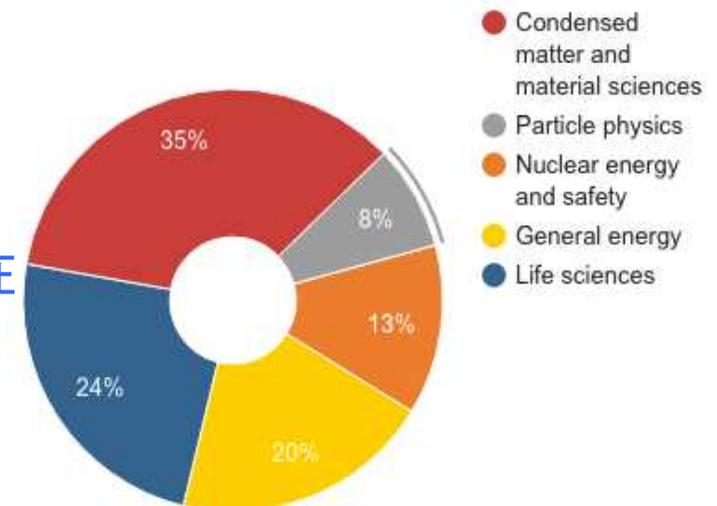


PSIにおける素粒子物理研究と加速器科学

- スイス国立の研究所 年間予算 400M CHF
 - 人件費が60%
- かつては素粒子物理研究が主たる研究分野であったが現在は物質科学、再生エネルギー研究も進める総合研究所
 - 素粒子研究のための年間予算50%→8%
- 大強度陽子加速器サイクロトロン¹の建設とその運転を基軸に研究を進展
 - Meson Factory (中間子工場)として、TRIUMF (カナダ) 研究所、LANL (米国) と同時期に加速器を建設
 - CERN PSとの競合
 - ミューオンを用いた μ SRによる物質科学研究の進展→SINQ中性子施設
 - π 中間子治療→陽子線治療
 - PSI Bファクトリ計画→SLS計画へ
 - Swiss FEL建設 (275MCHF)
- サイクロトロンは建設後に改良を加えながら現在は600MeV、1.3MWで運転中
 - 大強度フロンティア素粒子研究



The 2015 budget is distributed between the Paul Scherrer Institute's research areas as follows:



PSIにおける素粒子物理研究と加速器科学

- スイス国内にCERNとPSIという2つの素粒子物理研究を行う研究所があり、スイスはCERNに年間30MCHF、PSIには様々な形で必要な年間予算(400MCHF)の約9割を拠出している。
 - CERNは年間80MCHFをスイス国内産業に支出
- PSIでの素粒子実験は**ミュオン稀崩壊実験と中性子EDM実験のみ**。LHCにおけるCMS実験に参加する研究者もいるが検出器の建設が主な内容であった。
 - スイス研究者のLHCへの参加は大学の研究者が中心
- CERNは高エネルギーフロンティア素粒子研究、PSIは大強度フロンティア素粒子研究・物質科学のための加速器施設の運用を推進しており研究のすみ分けは出来ているが、**PSIは研究所の独自性を高めるために「企業との関わり合いを積極的に取り入れる」ことに力を入れている**。
- 現在のPSIでの研究の中心は素粒子物理ではないが、**加速器を維持してきたことで様々な研究の発展が実現できた。また人材育成にとっても素粒子物理研究・加速器科学の貢献は大きかった**。
 - 後のSwiss FEL建設へつなぐ。Swiss FEL建設では新たに人員を雇用することなく、所内の既存のリソースだけで実現している。
 - 研究所(スイスの大学)からのSpin offの積極的な推進
 - PSI(ETH)からのSpin offを活性化するための専門部署の創設

まとめ

- 欧州(スイス・ドイツ)における大型加速器施設を利用した素粒子物理研究は多数の優れた研究成果を上げてきている。現在、高エネルギーフロンティア素粒子物理の研究はCERNに集約されて行われている。
- スイスも含めた周辺国の加速器を有する研究所では、自由電子レーザーを含む放射光施設、大強度陽子加速器施設等、独自の施設を運転することで、高エネルギーフロンティア素粒子物理研究とは異なる形で研究を進めている。
- 加速器の新設時には、そこで行われる研究の重要性に加えて、その時点でどのような加速器技術が使用可能で将来どのような展開が可能かという点も考慮に入れる必要がある。このため各研究所は既存の加速器技術を継承しつつも新規に開発を進めることで、研究の多様性を将来に渡って保持しようとしている。
- 欧州ではどの研究所がどういう加速器を建設すべきかという議論は主にECFAで行われ、研究所がそれぞれの国に予算要求を行うという形で実現されてきた。
- HERA実験は加速器の建設において、それまで実験装置建設に採用されていた手法を採用して建設が行われた(HERA model)。
 - 多国チームによる加速器建設の最初の例であり、MoUに基づいて加速器構成要素を各国が責任をもって製作して加速器施設を完成させた。
- CERNがLEP, LHC(さらには将来のHigh-Lumi LHC)と超大型の加速器建設を行えた背景には、条約に支えられた安定的な予算の確保が可能であることが主たる要因であった。
 - CERNのこのような運営形態は60年に及ぶCERNの歴史の中で確立されてきたものであり、短期間で立ち上げるのは容易ではないだろう。