

4/17 奥野プロジェクトワークショップ

奥野加速器計画の歴史的な位置付けと課題

高山 健

(KEK, 名誉教授)

奥野プロジェクトアドバイザー委員

線型・円型加速器の進化

SLAC 2 mile Linac in 1967



e- Travelling W. Linac

Wideröe Linac

Alvarez Linac
at LBL in 1947

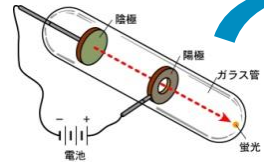
RFQ Linac
In 1968

Ultra-Low/high energy
Hadron Linac

Single cell cavity linac

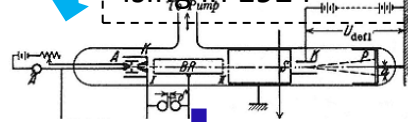
Low energy Hadron Linac

Evolution of Liner RF/Microwave Accelerator



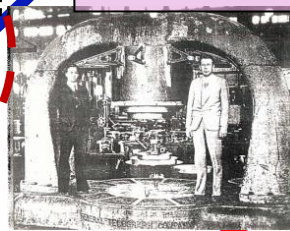
Cathode tube
Plücker in 1854

Two Gaps Accelerator
Ising in 1924



実証 by Wideröe in 1928

Cyclotron
Lawrence in 1931

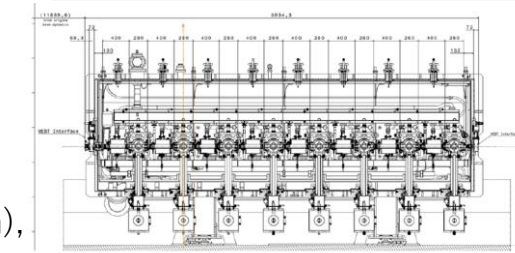


Evolution of Circular RF Accelerator

M. Oliphant (U. of Birmingham),
proposed in 1943

Synchrotron (Weak-Focusing)
McMillan, Veksler in 1945

3 GeV Cosmotron at BNL
6 GeV Bevatron at Berkeley



D+ 5->9 MeV SRF (HWR)
for IFMIF



Synchrotron (Strong-Focusing)
Christofilos in 1950
Courant, Snyder, Livingston in 1952

Synchrotron (Separate-function)
北垣敏男 (東北大) i in 1953

FFAG
K.Symon、
大河千弘 (東大) in 1954

Linear Betatron
Christofilos, Veksler in 1956

Induction Synchrotron
at KEK in 2000

Collider
High intensity driver
Synchrotron Radiation Source, Therapy Driver

(Solid-state power device)

(Modern technology: superconducting,
computer, novel mag.materials etc.)

Evolution of Induction Accelerator

Betatron
Wideröe in 1928



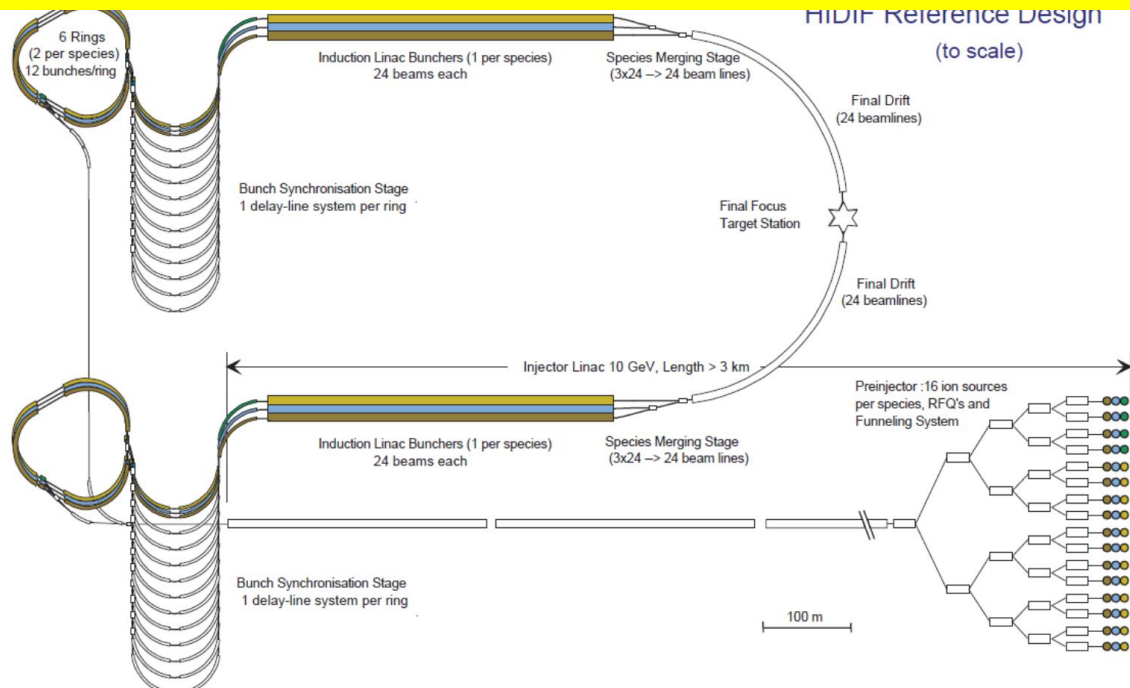
Betatron
Kerst in 1941

ATA at LLNL
in 1983
10 kA, 50 MeV

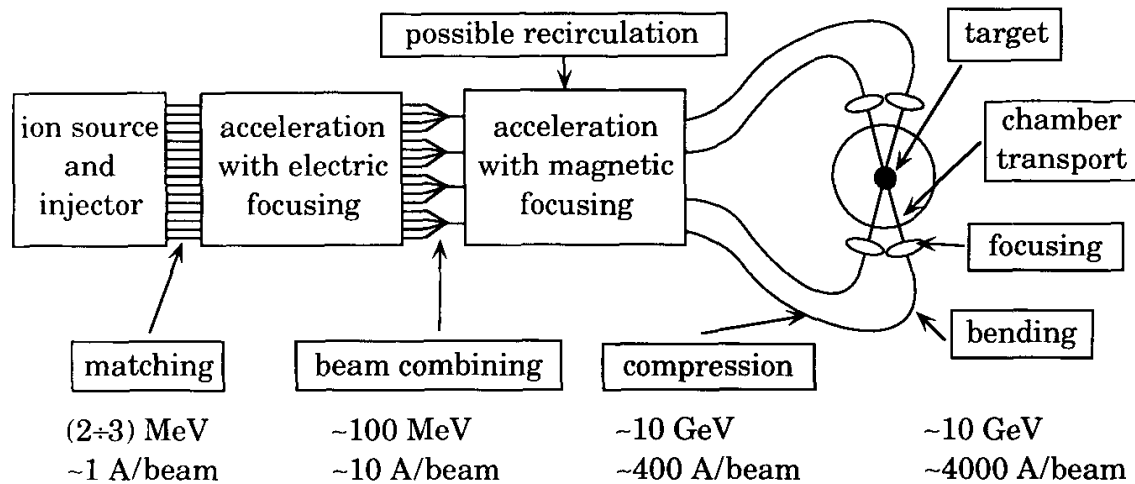


加速器と核融合1 (重イオン慣性核融合)

1. Heavy Ion Fusion Scenario based on RF accelerators in EU

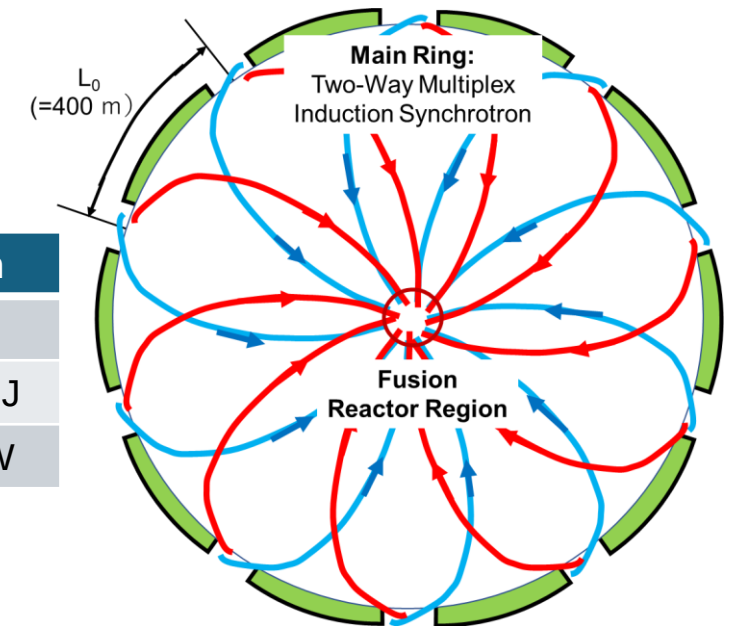
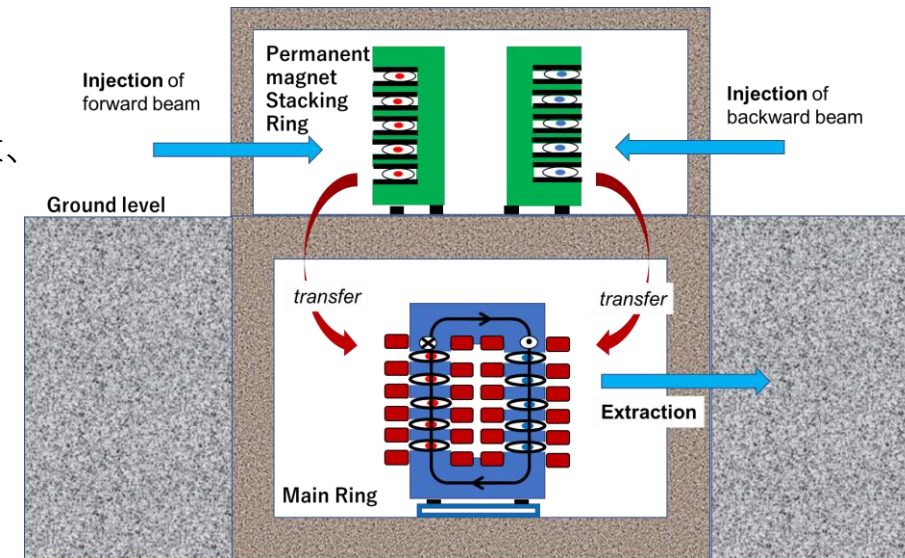


2. Heavy Ion Fusion Scenario based on Induction Linacs in US



3. Heavy Ion Fusion Scenario based on Two-Way Multiplex Induction Synchrotron in Japan

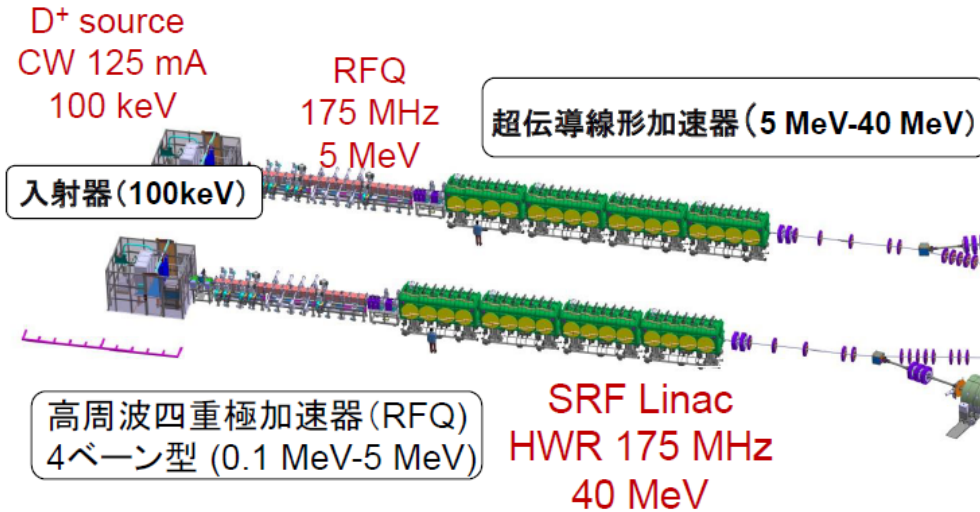
proposed
by Research Forum
Including 東京科学大、
長岡技科大、
QST-高崎研、KEK
in 2020



Circumference	4 km
Rep-rate	1 Hz
Beam power	40 MJ
Output power	2 GW

加速器と核融合2(サブシステム:大強度14.5 MeV 中性子源ドライバー)

IFMIF完成形(DONES or A-FNS)
CW 125 mA, D+ 40 MeV x 2
Beam power: 10 MW



加速器系
 重陽子40MeV x 125mAのラインが2基

- 定常運転で年間88%以上の稼働率
- 125 mAの大電流加速器

RFQ (5MeV/D⁺130mA)

- RFQ accelerator has 18 cavity modules.
- 10-micron level precision is required.
- 3 sections (6 modules) are under fabrication
- Vacuum test is planned in December.

Injector
 (Ion source + LEBT)
 (100 keV/D⁺140mA)

Injector
 CEA Saclay

RFQ

INFN Legnaro

QST

MEBT

CIEMAT Madrid

SRF
 (9MeV/D⁺125mA)

SRF Linac

CEA Saclay

CIEMAT Madrid

HEBT

CIEMAT Madrid

BD

CIEMAT Madrid

Diagnostics

CEA Saclay

CIEMAT Madrid

Cryoplant

CEA Saclay

RF Power

CIEMAT Madrid

CEA Saclay

SCK Mol

Building

Auxiliary System

Control system

Installation

QST

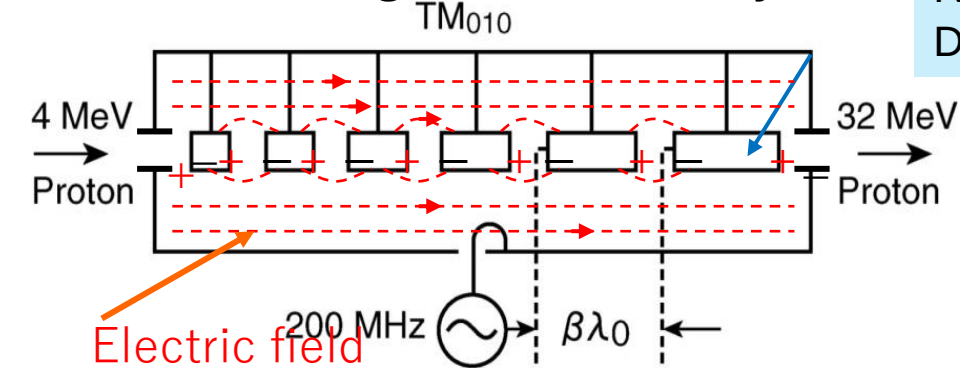
36 m

LIPAc (プロトタイプ of IFMIF)
CW 125 mA, D+ 9 MeV
Beam Power: $\sim 1 \text{ MW}$

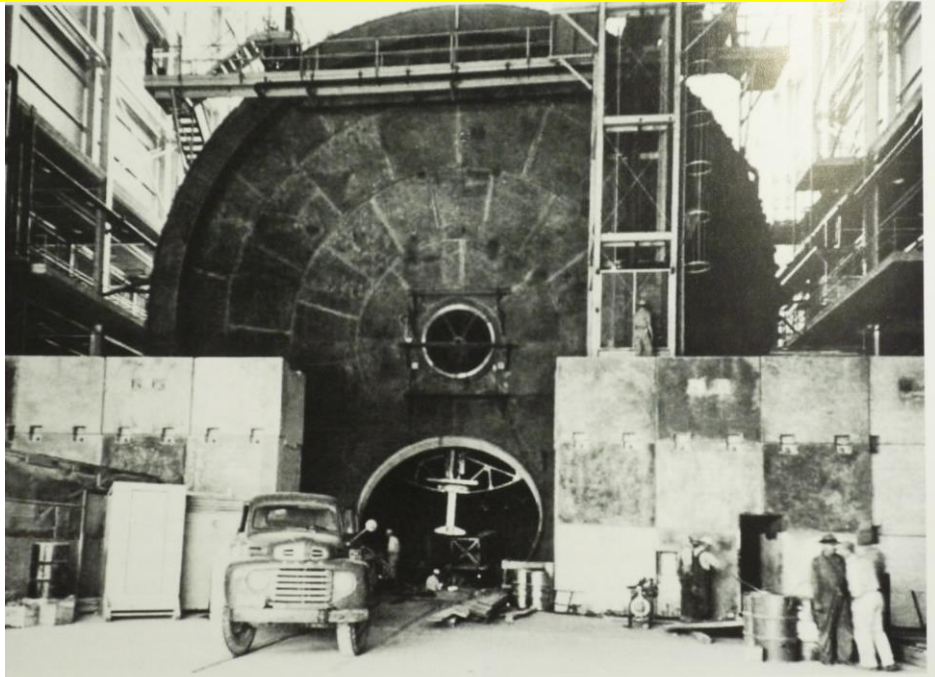
奥野加速器シナリオの歴史的 position 付け(大電流ビームに対する低速域でのSingle Cell Cavity Linacの可能性を問う)

Alvarez Linac at LBL in 1947 by Alvarez and Panofsky

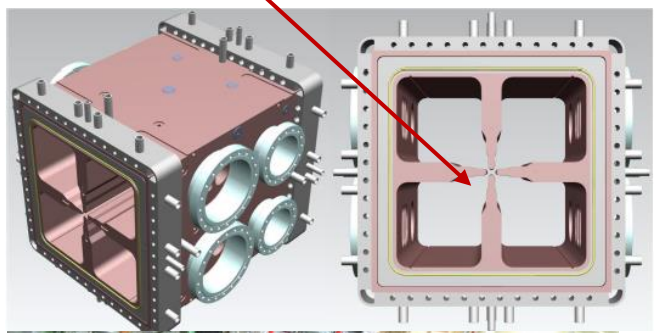
Drift tubes in a Large Resonant Cavity



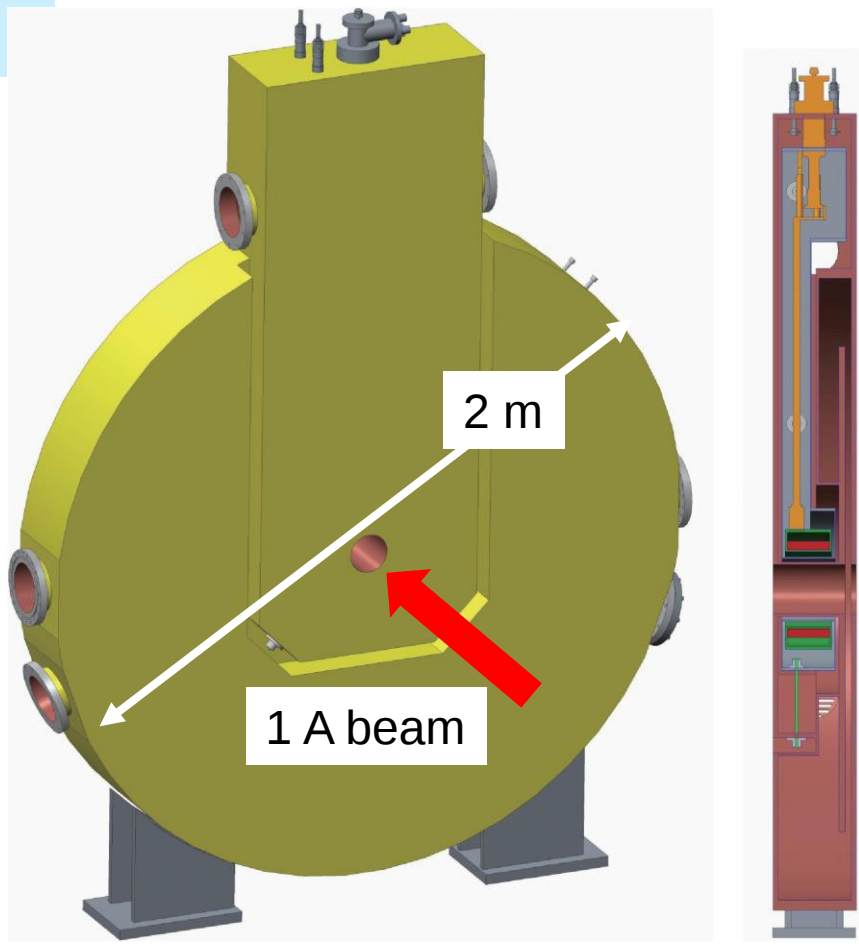
Material Test Accelerator at LLNL (1950-54)
D+, 250 mA, 7 MeV for production of T



Vanes in a large Resonant Cavity with the combined functions of acceleration and focusing in transverse direction
RFQ at QST 六ヶ所研 in 2019
D+, 125 mA, 5 MeV



リエントラント型共振器
25MHz、90 Cells(0.1->5 MeV)



最も単純構造のこのタイプの加速空洞で大電流加速に挑んだケースはまだないだろう。

1 A大電流イオンビームのロス無しでのSingle cavity linacによる加速の実証

- 10 cm径に広げた1A電流形態は空間電荷効果を考慮する限り**必然的選択**
- 低ベター域に於ける独立セルの**運転自由度（加速、収束）の大きさ**は期待できる
- 想定される加速電場300 kVが $1.2 \times E_k$ の前提は安心材料である ($E_k \approx 60 \cdot f^{7/8}$: Kilpatrick limit)
- 但し、低ベター領域の既存**大口径Alvarez Linac**や**Multiple aperture RFQ**との対比は十分なのか？
- Single cell空洞励起に必要な**サブシステム**の準備（予算確保も含め）
 - 25 MHz RFパワー源は**半導体パワー源か4極管か**？それらは自主開発か？開発協力企業は見出せるか？
 - パワーコンバイナー、サーキュレーター、RFカップラーは自主開発か、開発協力企業は見出せるか？
- バンチング過程で発生する下流域でのハロー候補及び加速途上のハローをどこまで減らせるか？
 - **ハロー粒子生成を抑えられるか**？
空間電荷効果、intrabeam scattering、machine imperfections考慮した**reliable halo simulation**が可能か？
 - **ハロー除去は局在した場所**（その領域は立ち入り不可、ビームダンプ或いは原子炉並みに扱う）**で可能か**？
- 5 T solenoid磁場は**multi-pactoring**で発生する電子を増殖させる可能性はないのか？
磁束クランプの利用による B_r のビーム本体への影響は？

Ion Cyclotron Auto-Resonance Acceleratorの実証：

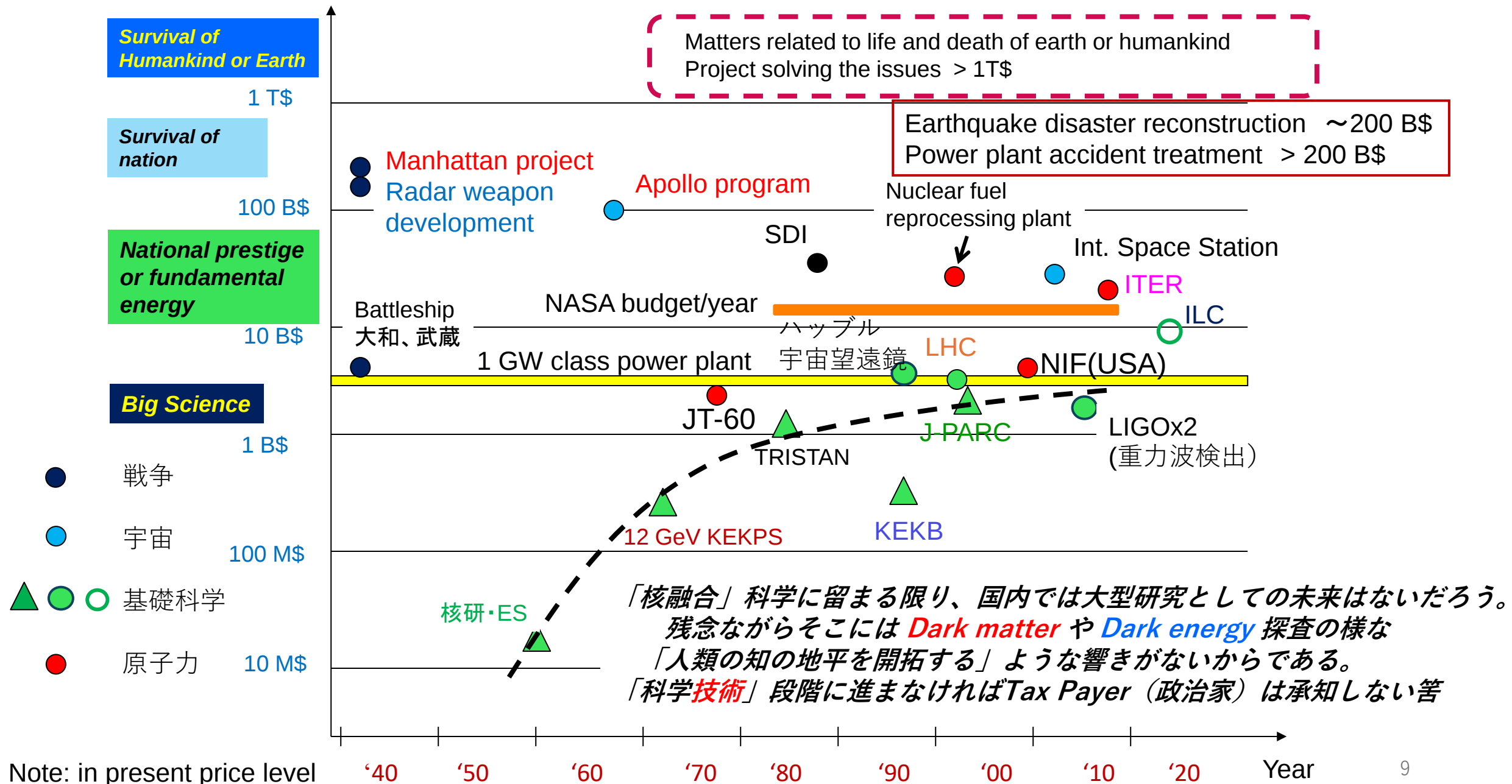
- 電磁場を用いた荷電粒子の**加速**と**減速**は**双対的**な位置関係にある
- 1960年代に発明された円偏向電場と軸方向磁場で拘束された電子の運動とのcouplingがマイクロ波増幅器の発信・増幅機構として利用された。これと類似の機構をイオンの連続加速に展開するのが**CARA**である。
- 指向性を犠牲（ $v_{\perp} \gg v_{\parallel}$ ）にして加速効率を優先する**大電流イオンビーム加速**は可能か？
 - 米国ベンチャーがBNLとの共同研究で研究開発のactivityは存在するが、原理実証が成功したとはまだ聞かない
 - 研究の進化レベルは**他加速器の初期段階にも至っていない**かも知れない。CST-Studio Simulationでどこまでその実現性に迫れるのか？
 - **軸対称を維持した加速器configuration**は取れるか？
 - **学術的な意味**でその原理実証実験は重要である
- **核融合サブシステムとしての応用**（14.5MeV 中性子源としても40 MeV D+ドライバー、 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合用 1 MeV proton ドライバー）を考えた場合の解決されるべき課題
 - Azimuthal方向への指向性を持ったビームの取り出しと空洞構造の折り合い
 - 大きな空洞投入パワーが要求されるが、ビーム負荷、放電限界、空洞ジュール損を考慮して現実的パラメーターの早期評価（**シナリオ自身の成立性**）

付録

報告者の核融合に対する基本的なスタンスと認識

時間が残っておれば、少し解説します

Big Science (巨費科学)はどこまで許されるのか？(核融合研究に未来はあるのか？)



核分裂と核融合の技術進化の違い

	物理素過程の 発見	原理実証			実証炉 原型炉 商用炉	深刻な問題点 or 今後の課題
核 分 裂	1938 ウランの核分 裂 オットー・ハー ン他 1939 核分裂理論の 完成 マイトナー他	原爆	1945 トリニティー実験	■ 連鎖反応という 特異な物理 ■ 戦中の圧倒的R&D	1951 初の原子力発電 EBR-I (米)	■ 消えない臨界事故のリスク ■ 超半減期核種の生成 ■ それを含む核廃棄物の管 理・保守のリスクとコスト ■ 生成プルトニウムの処理・ 管理のコスト
		制御核 分裂	1942 核分裂炉の実証 フェルミ他		1954 オブニンスク原 子力発電所 (ソ連) 1954 原子力潜水艦用 原子炉 (米)	
		17 年				
何故、重力 (太陽)、慣性力 (原爆トリガーの水爆) ではなく ローレンツ力「真空中に不安定なエネルギー媒体 (高温・高密 度プラズマ) を生成・維持する手法」を何故採用した？						
核 融 合	Atkinson and Houtermans “Transmutation of the lighter elements in stars”, <i>Nature</i> (1929) G.Gamow and E. Teller, “The Rate of Selective Thermonuclear Reaction”, <i>Phys. Rev.</i> (1938)	水爆	1949 ソ連での最初の実験 1952 エニウェタク環礁実 験 (米)	70年間に亘る Plasma閉じ込めR&D JT-60, LHD, W7-X, JET, TFTR, EAST, DIII-D, KSTAR, Tore Supra	2032 ITER	■ 駆動エネルギーの集中 ■ ドライバー容器」全体の放 射化 ■ 耐久性を持つ炉壁材料の実 現 難しい手法を選択して来たよう に部外者には見える
		制御熱 核融 合	磁場 閉じ 込め In early 50's ZETA, Spizer's idea Stellarator 1958 Scylla I (LANL)実験 1958 Tokamak(ソ連)		?	
		慣性 核融 合	1970年代 Laser inertial fusionの提案 1970年代 Light/heavy ion inertial fusionの提案	激光XII号, NOVA 2014 NIF実験 要素技術のR&Dに留ま る	?	
重力波の予想と精密検出との対比： 1916 アインシュタインの一般相対論 2016 LIGOによる検出成功						
加速器社会からの提言がメジャーになったことはない						