

トカマク型核融合原型炉のコストモデルの比較検討 Comparative Study of Cost Models for Tokamak DEMO Reactors

名古屋大学 大石鉄太郎, 近藤拓也

研究協力

名古屋大学 山崎耕造, 伴 佳奈恵, 尾関 秀将, 栗田 大輝, 長谷川 誠, 真野 純次
JAEA 飛田 健次, 朝倉 伸幸, 星野 一生, 中村 誠, 宇藤 裕康, 染谷 洋二
NIFS 後藤 拓也

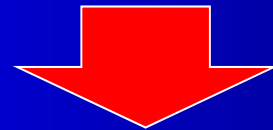
平成23年度BA原型炉設計共同研究「核融合炉のコストモデルの比較検討と原型炉への提案」
の援助を受けました。

Table of Contents

- 背景：原型炉研究におけるコスト計算の位置づけと考え方
- 既往のコスト計算研究の紹介
- システムコードを用いたコスト計算とパラメータ依存性の評価
 - 炉設計・コスト評価コードPEC (physics-engineering-cost)
 - PECコードによるSSTR-likeなトカマク原型炉のコスト評価
- まとめと今後の課題

背景：原型炉研究におけるコスト計算の位置づけ

- 原型炉には核融合実用化以降の経済的展望を示すことが求められるため、その概念の構築にあたっては経済的側面の検討が重要になる。
- 原型炉の設計パラメータの選定にあたっては、費用対効果に対する見通しを提示する必要がある。



- 国内外で提案されてきた核融合炉の経済性評価例及びその手法を調査する。各手法の特徴を明らかにし、原型炉のコスト評価に適したコストモデルの提案を目指す。
- システムコードによる炉設計とコスト評価という手法を用いて、設計パラメータのスキャンを行い、各パラメータがコストに及ぼす影響を調べる。
- 本研究でのコスト評価指標：総資本費（総建設費）

背景:コスト計算の基本的な考え方

- 各勘定項目ごとに重量×単価を加算する。一部のプラント・機器・コンポーネントについては、すでに計算された直接建設費をもとに、熱出力や体積などに対するスケーリングで簡易計算。し、次の費用や効果を考慮。
 - (a) 設計調整費(design allowance):コストを評価した時点での(技術的に未熟な)設計と、最終的に確立した実証済みの設計との差を考慮。
 - (b) 習熟効果・量産効果:習熟係数 F =製作台数が2倍になったときのコストと元のコストの比。
 - (c) 予備品費(spare parts allowance)
 - (d) 調整費(contingency allowance):臨時費とも呼ばれる。建設期間中や試験期間中の予測できない費用。自然現象や設計と関係ない問題に起因する不確定の費用。
※ただし(a)~(d)が常に陽に考慮されるわけではない。
- 一部のプラント・機器・コンポーネントについては、すでに計算された直接建設費をもとに、熱出力や体積などに対するスケーリングで簡易計算。多くは経験式。
- その他の費用
 - (a) 間接費:「建設用の施設・設備・サービス」「技術および建設の管理」「その他(オーナーズコスト)」
 - (b) 建設中利子
 - (c) 建設中エスカレーション(current dollar modeのみ)

背景:コスト計算の基本的な考え方

物量 × 単価

設計調整費, 予備品費, 調整費
習熟効果・量産効果(商用炉の場合のみ)

直接建設費

建設用資材およびサービス,
設計・建設管理, オーナーズコスト

建設中利子
建設中エスカレーション(current dollar modeの場合のみ)

総建設費(総資本費)

核融合炉総資本費計算フローの一例

既往のコストモデル研究～米国～

- STARFIREトカマク炉: 1980年代初頭の, ANL (Argonne国立研究所) による炉設計と経済性評価. コスト解析のための勘定(費用)項目, 単価, スケーリング則がまとめられる.
- Generic Magnetic Fusion Reactor Model (Generomak Model): ORNL (Oak Ridge国立研究所) のJ. Sheffieldらが, 1986年に提案. 包括的なコスト評価とパラメータ依存性解析を意図し, 既往の概念設計例をベースとした, 経済性解析モデルの開発と発電単価のパラメータ依存性が検討された.
- 「磁気閉じ込め核融合エネルギーの環境・安全・経済性委員会 (ESECOM)」: LLNL (Lawrence Livermore国立研究所) により, Generomak Modelを基本としたさらに精細な評価が1986-89年になされた.
- ARIES: UCSD (カリフォルニア大学サンディエゴ校) により, 主に最適化やパラメータ依存性の検討を目的として, 簡易化したモデルを用いる解析が1988-90年になされた.

既往のコストモデル研究～欧州～

- EEF (Environmental, Safety-Related and Economic Potential of Fusion Power)-study group (EC委員会のもとに設置)による評価:手法は米国の Generomak model/ESECOMに近い簡易モデル計算である. トカマク本体・建屋レイアウトなどは, 実験炉NET設計用に開発された”SUPER-COIL code”による.
- SCAN-2 Model: 実験炉NETのコスト解析に用いられたSCAN(The System for Cost Analysis of NET Model)を, 核融合発電炉コスト解析用に改良してコスト評価がなされた.

既往のコストモデル研究～日本(1)～

SSTRの総資本費評価: 具体的な設計に基づき, 物量を積み上げてコストを算出する.

表: 原研(JAERI)と未来工学研究所(IFTECH)の比較
→「4.1トカマク本体価格」に差が生じている. これは直接建設費に一定の割合をかけて求める間接費や建設中利子の差にもつながる.

Breakdown	JAERI [Myen]	IFTECH [Myen]
1. Land & land rights	5000	5100
2. Structures & site facilities	8000	7882
3. Buildings	37380	47340
4. Fusion reactor		
4.1 Tokamak main body	223600	300000
4.2 Main heat transport systems	23877	23877
4.3 Current drive & heating	45000	59760
4.4 He refrigerator system	10000	25200
4.5 Fuel handling and storage	20000	23760
4.6 Power supply, switching	32000	40320
4.7 Radioactive waste management	5000	10000
4.8 Maintenance equipments	10000	12240
4.9 Air conditioning equipments	16644	16644
4.10 Radiation monitor	5000	1000
4.11 Instrumentation and control	20000	23760
5. Machinery equipments	112199	117081
6. Misc. equipments	12000	28041
7. Utility cost	46856	74205
8. Interest during construction	82059	117206
Total capital cost	714615	933456

既往のコストモデル研究～日本(2)～

システムコードによる炉設計とコスト評価

...プラズマ性能とエネルギーフローから
炉設計パラメータを決定するモデル計算.

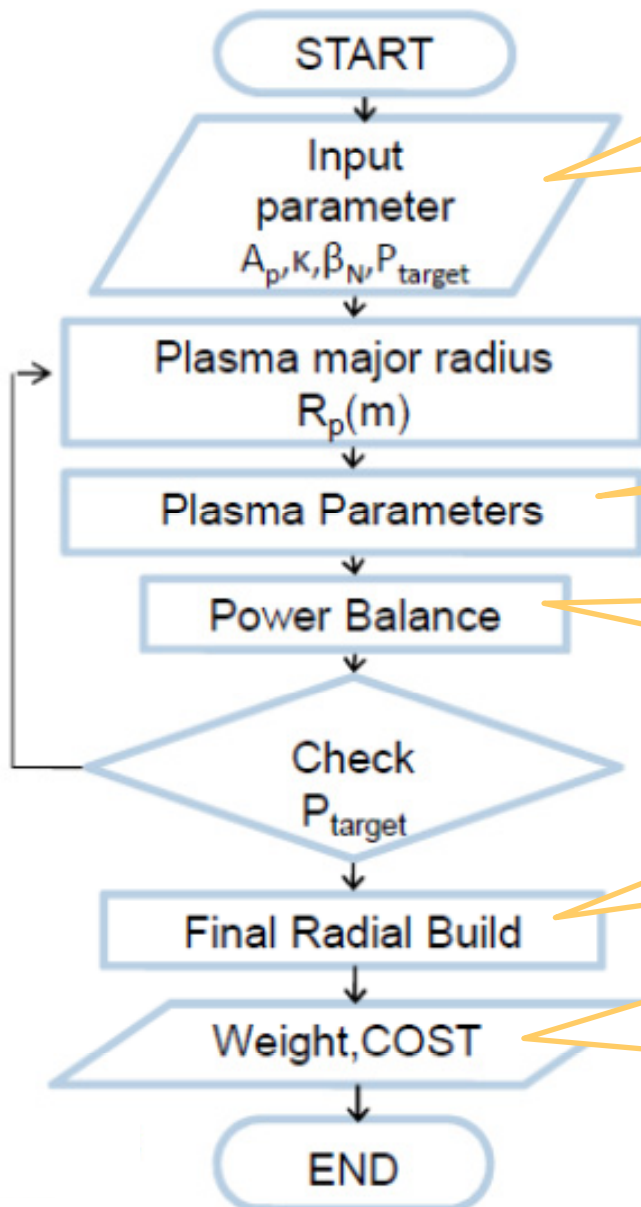
設計パラメータのスキャンを行うことで,
各パラメータがコストに及ぼす影響を調べることができる.

電力中央研究所のFUSAC (fusion power plant system analysis)コード

名古屋大学のPEC (physics-engineering-cost)コード.

コスト評価法の一例

炉設計・コスト評価コードPEC (Physics-Engineering-Cost)



目標送電端出力 ($P_{target} = 500-2000 \text{ MW}_e$) およびプラズマのパラメータや形状 ($\beta_N, \kappa, \delta, A_p$), 装置パラメータ (j_{max}, B_{max}), 温度・密度分布をインプットとして入力.

プラズマ大半径, 核融合出力, プラズマ電流, 必要な電流駆動パワーなどがエネルギーフローを考慮して計算される.

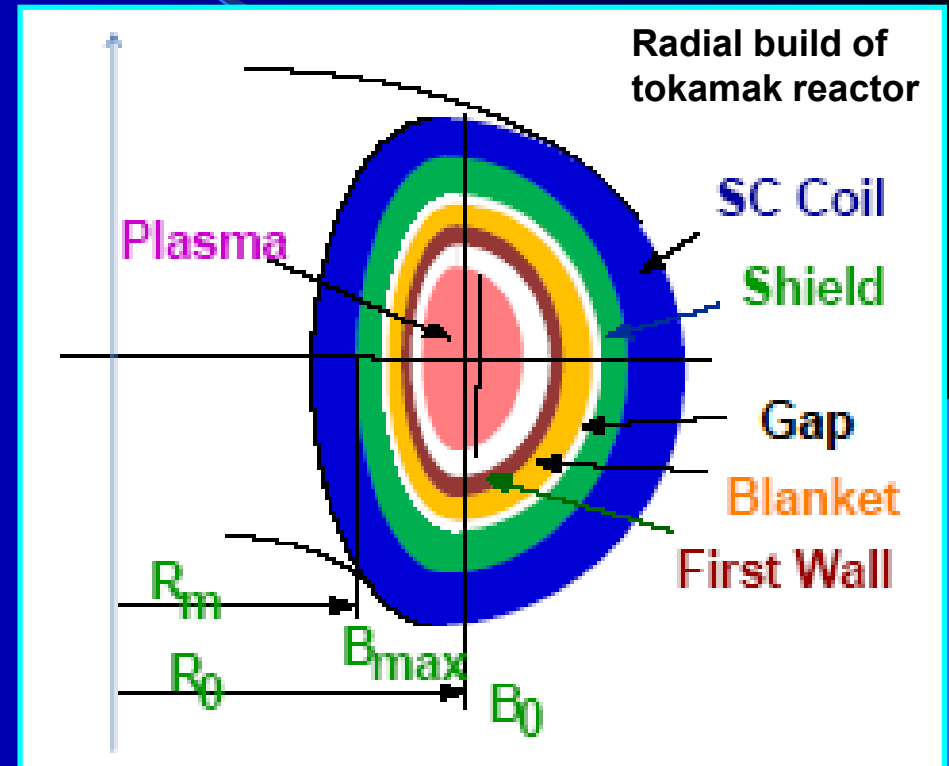
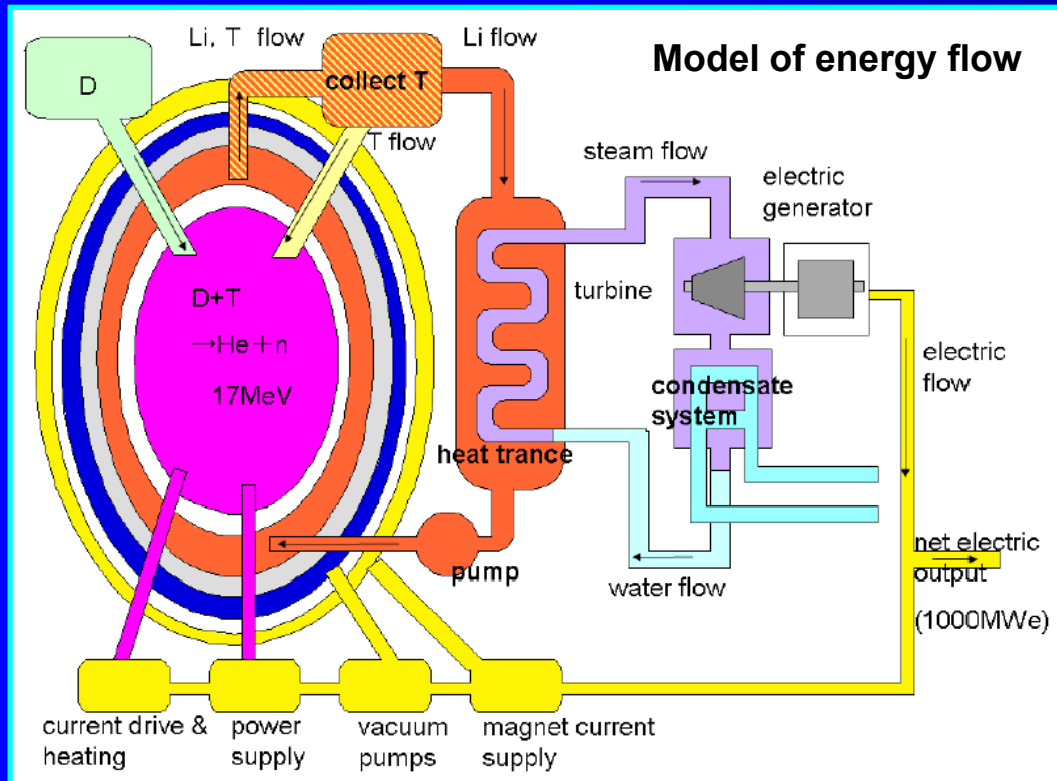
送電端出力が計算される.

送電端出力が目標値と合致すれば, 大半径に基づきラジアルビルドが決定される.

炉心(FI: Fusion Island)に用いられる材量の物量がコスト評価の基礎データとなる.
付帯設備(BOP: Balance Of Plant)のコストは熱出力や電気出力のスケージングから求められる.

コスト評価法の一例

炉設計・コスト評価コードPEC (Physics-Engineering-Cost)



基本設計: SSTR-likeトカマク原型炉

- SSTR (steady state tokamak reactor) を参考にし、PECコードを用いてトカマク原型炉を設計した。送電端 出力1080 MW。

	PEC	SSTR
Major Radius R_p	7.09 m	7.0 m
Aspect Ratio A_p^a	4.1	4.1
Ellipticity κ^a	1.85	1.85
Triangularity δ^a	0.4	0.4
Maximum field B_{max}^a	16.5 T	16.5 T
Toroidal field B_t	9.14 T	9.0 T
Normalized beta β_N^a	3.0	3.3
Safety factor q_{95}^a	5.0	5.0
Plasma current I_p	11.6 MA	12.0 MA
Central ion temperature $T_i(0)^a$	34 keV	34 keV

^ainput of PEC.

Breakdown	Cost [M\$]
Total direct cost	2984.7
Fusion island	1271.4
Balance of plant	1713.3
Total indirect cost	2795.1
Total capital cost	5779.7

● 既往のコスト研究との比較のためには、適切な円-ドル換算レートが必要。

● 総資本費**5779.7 M\$**は (PECコード中で使用されている2003年ドルを想定して)

- 為替レート116 Yen/\$ →6700億円

- 購買力平価 (GDP算出項目で算出)

140 Yen/\$ (both in 2003) →8090億円

既往のSSTR総資本費評価7200億円 (Fusion Reactor System Laboratory: JAERI-M (1991) 91-081)と同程度。

⇒設計パラメータ β_N , B_{max} , f_{th} , P_{trg} をスキャンし、コストへの影響を試みる

基本設計: SSTR-likeトカマク原型炉

- PECコードで設計したSSTR-like DEMOの総資本費の内訳は以下のとおり.

Breakdown	Cost [M\$]
Total direct cost	2984.7
Fusion island	1271.4
Balance of plant	1713.3
Total indirect cost	2795.1
Total capital cost	5779.7

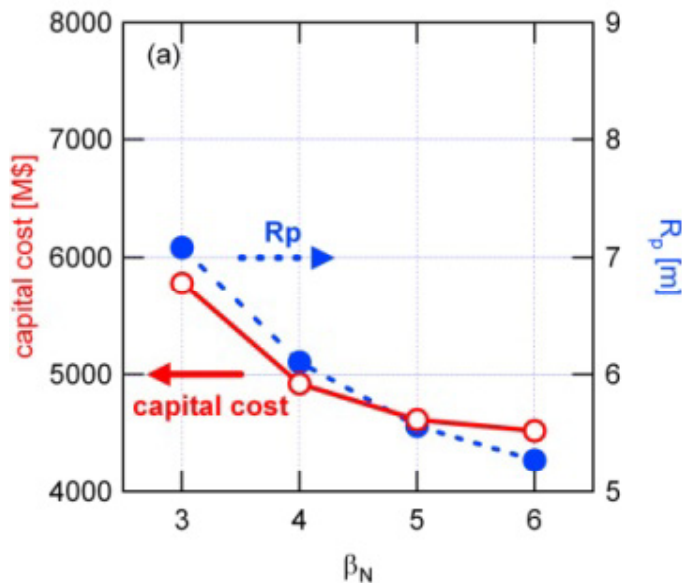
Breakdown	Cost [M\$]
Fusion island	1271.4
FW/blanket/reflector	128.2
Shield	315.5
Magnets	354.0
Current drive & heating	225.9
Primary structure & support	62.5
Vacuum systems	106.2
Power supply, switching	67.6
Impurity control & divertor	11.5
ECRH breakdown system	4.9

Breakdown	Cost [M\$]
Balance of plant	1713.3
Land & land rights	12.7
Structures & site facilities	433.6
Main heat transport systems	473.9
Auxiliary cooling system	5.7
Radioactive waste management	10.1
Fuel handling and storage	108.2
Other reactor plant eqt.	9.2
Instrumentation and control	46.8
Turbine plant equipment	345.2
Electric plant equipment	170.0
Misc. plant equipment	83.0
Heat rejection system	0.0
Special materials	14.9

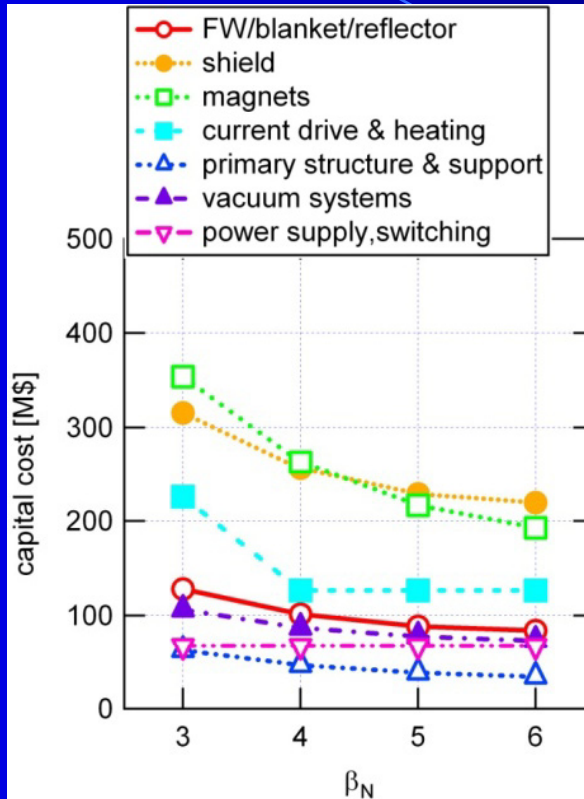
Breakdown	Cost [M\$]
Total indirect cost	2795.1
Construction services & eqt.	358.2
Home office engr. & services	155.2
Field office engr. & services	179.1
Owners cost	551.6
Process contingency	0.0
Project contingency	731.6
Interest during construction	819.4

総資本費の規格ベータ値 β_N 依存性

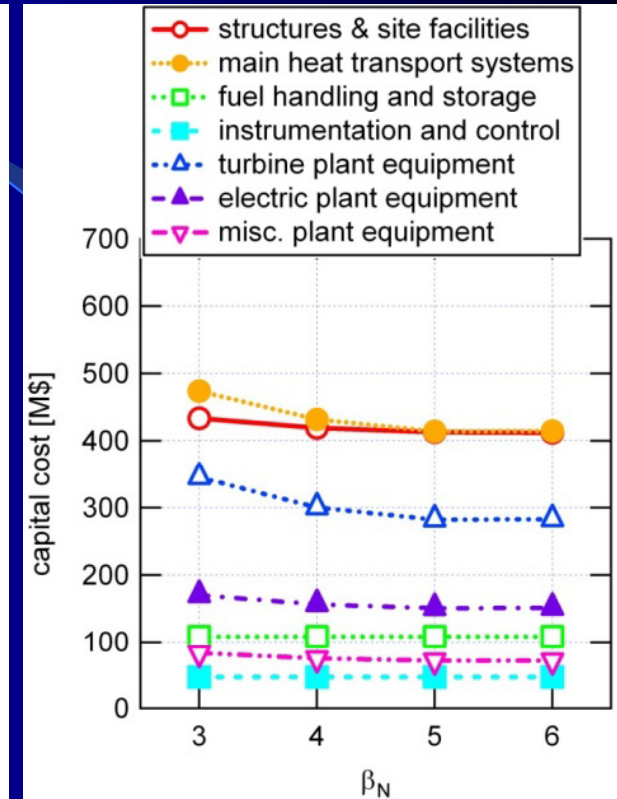
β_N dependence of capital cost and R_p



Fusion island



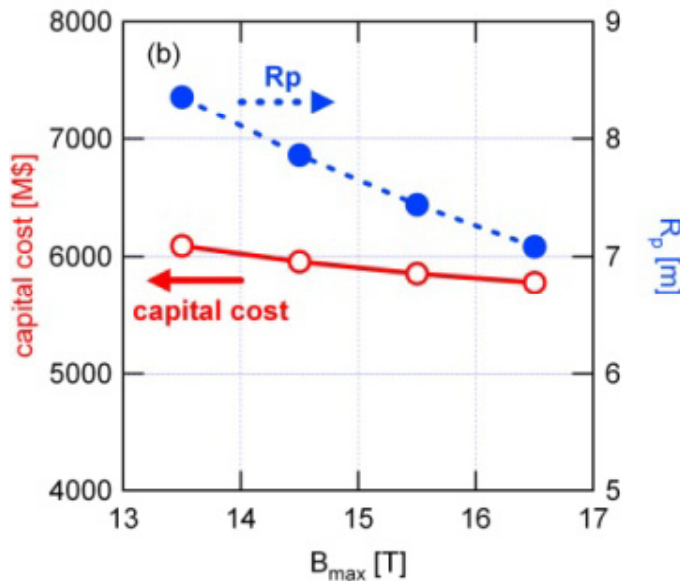
Balance of plant



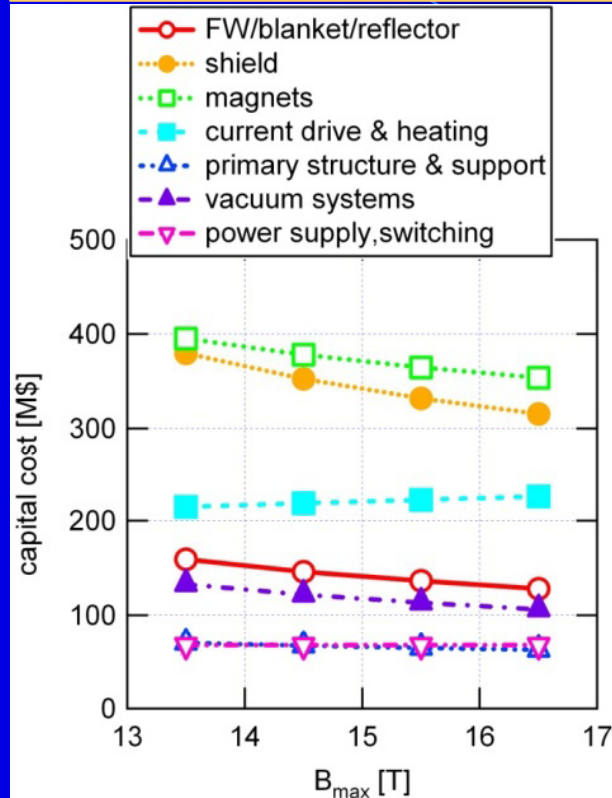
- FIのコスト中で、シールド、コイル、電流駆動・加熱装置が大きな割合を占め β_N との相関が高い。
- 低 β_N ではブートストラップ電流の割合が低いため、電流駆動・加熱装置の増加が大きい。

総資本費の最大磁場 B_{max} 依存性

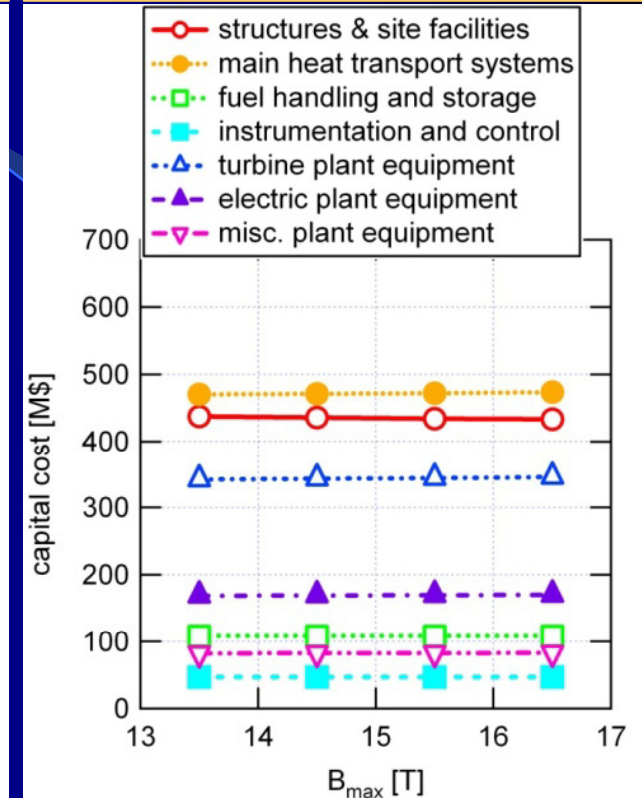
B_{max} dependence of capital cost and R_p



Fusion island



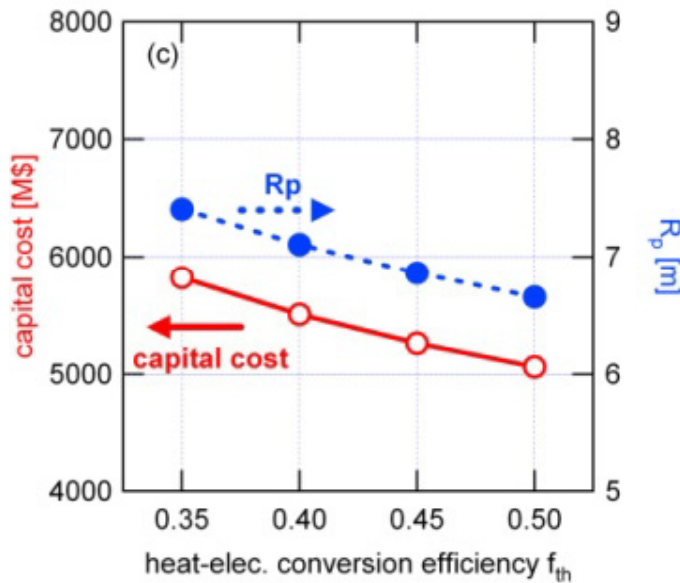
Balance of plant



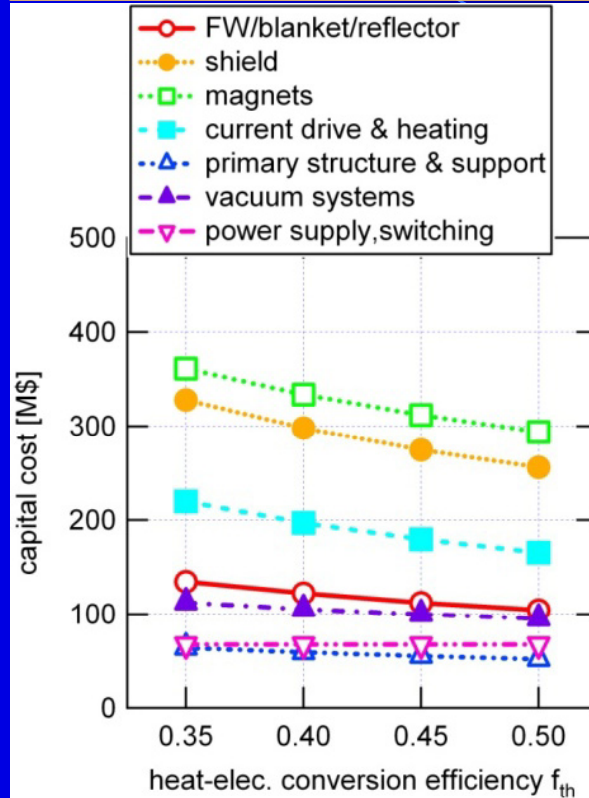
- R_p の B_{max} 依存性は明らかだが、総資本費の変化は小さい。
- FI中で第一壁/ブランケット/(反射材), シールド, コイルは R_p に依存するが、BOPのコストはほぼ変わらない。

総資本費の熱効率 f_{th} 依存性

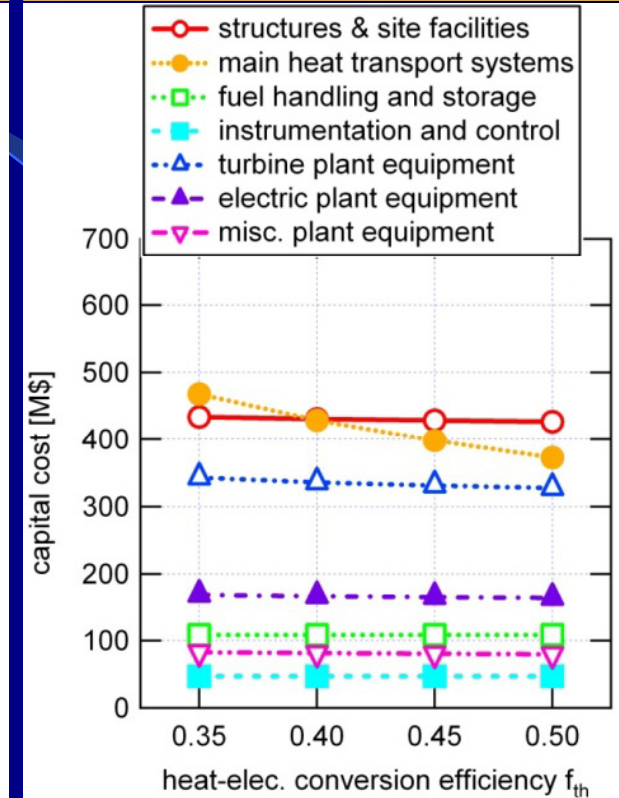
f_{th} dependence of capital cost and R_p



Fusion island



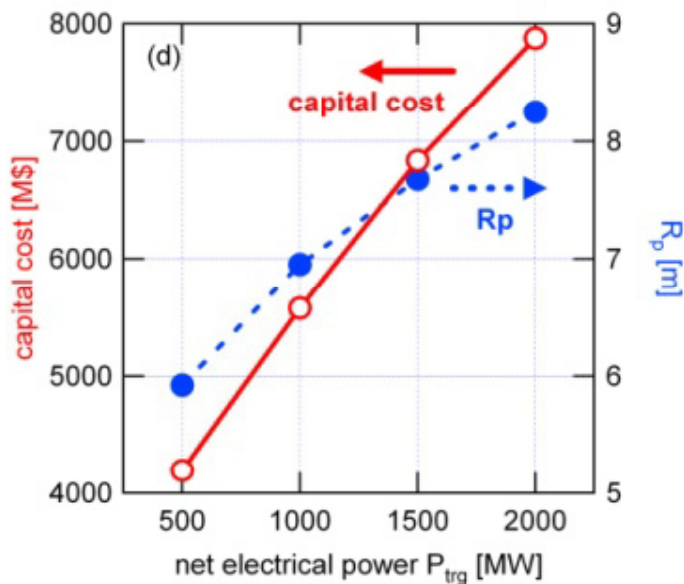
Balance of plant



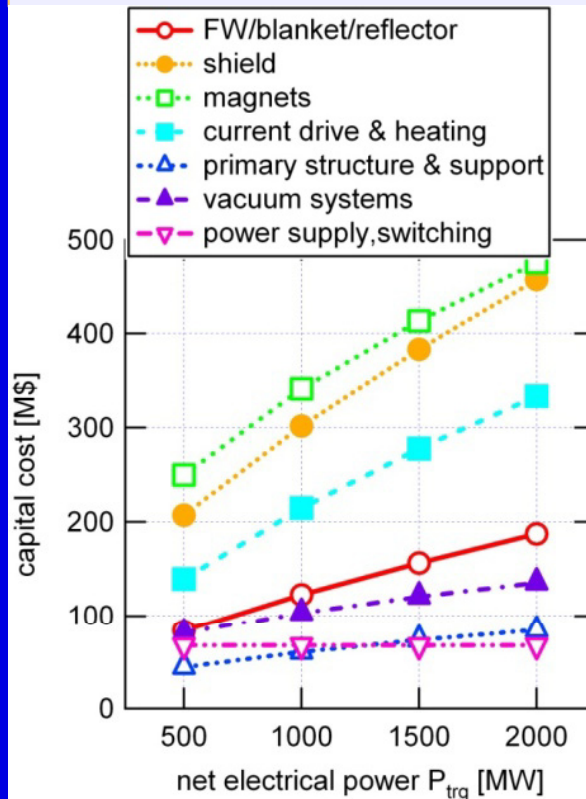
- f_{th} の増加により, FI中のほとんどの項目のコストが減少.
- BOP中の主熱交換システムのコストも減少.

総資本費の送電端出力 P_{trg} 依存性

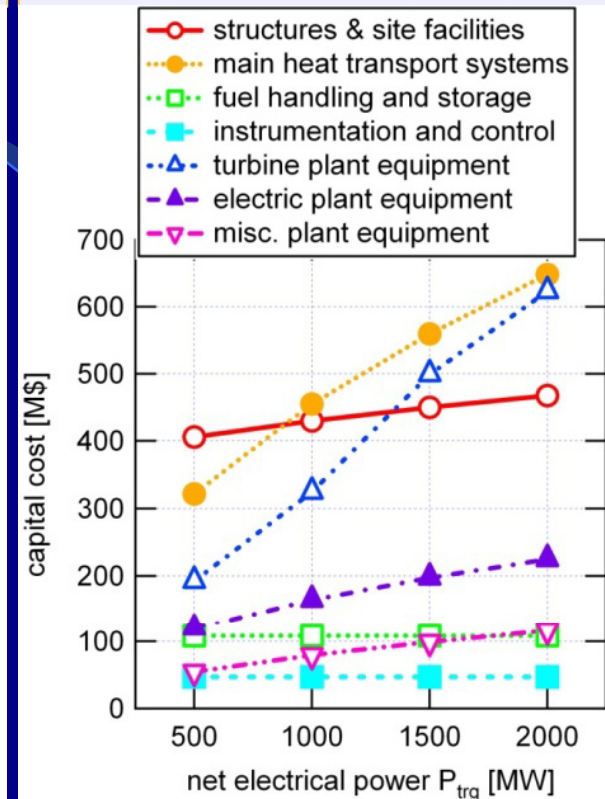
P_{trg} dependence of capital cost and R_p



Fusion island

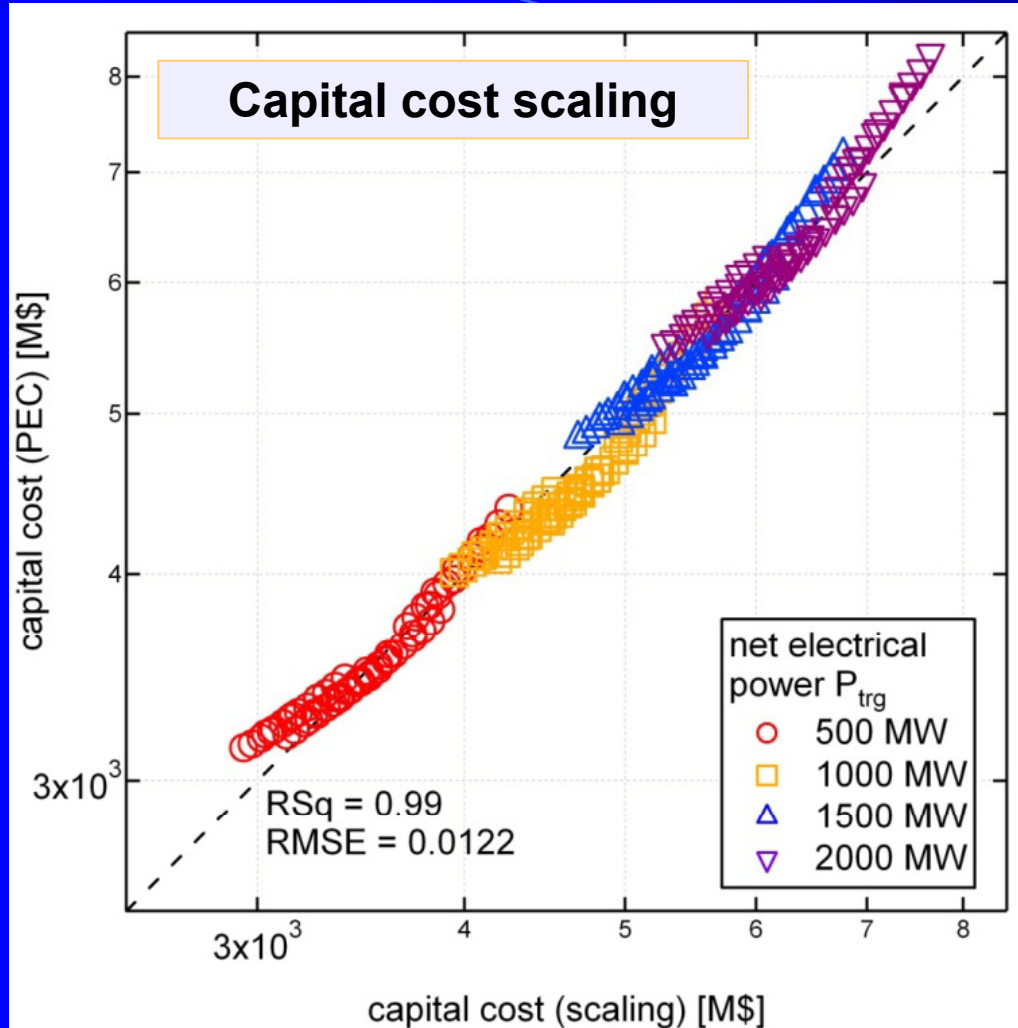


Balance of plant



- BOP中のタービン設備の P_{trg} 依存性が大きいいため、総資本費の P_{trg} 依存性も大きい。
- P_{trg} を500 MWから2000 MWまで4倍化しても、総資本費は2倍化で済む。

総資本費の設計パラメータスケールリング



● 重回帰分析により、総資本費の設計パラメータスケールリングを導出。

$$\beta_N = 3-6$$

$$B_{max} = 13.5-16.5 \text{ T}$$

$$f_{th} = 0.35-0.5$$

$$P_{trg} = 500-2000 \text{ MW}$$

$$CC [M\$] = 10^{2.727} \beta_N^{-0.3284} B_{max}^{-0.1896} f_{th}^{-0.2884} P_{trg}^{0.4227}$$

- パラメータ依存性としては、送電端出力に対する依存性が最も大きい。
- 工学的な制約(中性子壁負荷など)は今後検討する。

まとめと今後の課題

- 原型炉のコストモデルを提案するために、既往のコストモデル研究を比較・検討中である。
- 炉設計・コスト評価コードPECを用いて、原型炉のコスト評価解析を進めている。
- SSTR (steady state tokamak reactor) を参考とした原型炉をPECコードにより設計した。計算された総資本費は既往のSSTRのコスト評価でのものと同程度となった。
- 設計パラメータスキャンと重回帰分析により、総資本費のパラメータ依存性を調べることができる。
- コスト評価の結果を既往の評価研究のものと比較するためには、それぞれのモデルでの設計上の仮定・勘定項目・パラメータ依存性を明らかにしなければならない。
- 発電単価(COE)の評価につなげるためには、習熟効果・量産効果・設備利用率・運転期間を計算に含める必要がある。
- 安全性を考慮した設計ウィンドウの中でコスト評価を行ったほうが良いように思う。