

核融合炉実用化の技術課題と球状トカマク研究による解決の見通し : 4. STにおける運転制御 : 4.1 立ち上げ

御手洗, 修
九州東海大学

<https://hdl.handle.net/2324/1544163>

出版情報 : Technical Report. 1118, pp.22-24, 2008-06-10. The Institute of Electrical Engineers of Japan
バージョン :
権利関係 :



第**1118**号

2008年6月

核融合炉実用化の技術課題と 球状トカマク研究による 解決の見通し

球状トカマク調査専門委員会編

電 気 学 会 技 術 報 告

電 気 学 会
基礎・材料・共通部門
プラズマ技術委員会

核融合炉実用化の技術課題と 球状トカマク研究による解決の見通し

球状トカマク調査専門委員会編

目 次

1. はじめに	3	6. 日本の ST 研究	45
2. ST における炉工学	4	6.1 日本の ST 研究体制	45
2.1 経済性を考慮した炉設計	4	6.2 TS-3/TS4	45
2.2 ブランケットの交換	7	6.3 TST-2	49
2.3 高レベル廃棄物の核変換処理	11	6.4 UTST	51
2.4 発電以外の核融合の応用	14	6.5 LATE	53
2.5 間接冷却型超電導コイル	16	6.6 HIST	54
3. ST におけるプラズマ壁相互作用	20	6.7 CPD	55
3.1 SOL/ダイバータ	20	6.8 QUEST 計画	60
3.2 液体金属ダイバータ	21	7. 世界の ST 研究	64
4. ST における運転制御	22	7.1 世界の ST 研究の現状	64
4.1 立ち上げ	22	7.2 ST 型 CTF の検討状況	65
4.2 プートストラップ電流と β 限界	24	8. まとめ	65
4.3 EC 加熱・電流駆動	26		
4.4 NBI 加熱	27		
5. ST におけるプラズマ閉じ込めの物理	28		
5.1 二流体 MHD 平衡	28		
5.2 ゆらぎ、流れと輸送	31		
5.3 緩和現象理論	35		
5.4 MHD シミュレーション	41		
5.5 α 粒子の物理	43		

球状トカマク調査専門委員会委員

委員長 長山 好夫(核融合科学研究所)
幹事 小野 靖(東京大学)
高瀬 雄一(東京大学)
幹事補佐 西尾 敏(日本原子力研究開発機構)
委員 前川 孝(京都大学)
永田 正義(兵庫県立大学)
中村 一男(九州大学)
花田 和明(九州大学)
近藤 義臣(群馬大学)
御手洗 修(東海大学)
浅井 朋彦(日本大学)
石川 本雄(筑波大学)
平野 洋一(産業技術総合研究所)
岡田 成文(大阪大学)
大西 正視(関西大学)
岡野 邦彦(電力中央研究所)
時松 宏治(地球環境産業技術研)
桂井 誠(東京大学名誉教授)

主な参加者 飛田 健次(日本原子力研究開発機構)
朝倉 伸幸(日本原子力研究開発機構)
谷 啓二(日本原子力研究開発機構)
江尻 晶(東京大学)
大野 哲靖(名古屋大学)
田中 靖敏(名古屋工業大学)
三戸 利行(核融合科学研究所)
長壁 正樹(核融合科学研究所)
水口 直紀(核融合科学研究所)
石田 昭男(新潟大学)
岸本 泰明(京都大学)
小西 哲之(京都大学)
佐藤 浩之助(九州大学)
関子 秀樹(九州大学)
坂本 瑞樹(九州大学)
出射 浩(九州大学)
新谷 吉郎(アイテル技術サービス)
西谷 健夫(日本原子力研究開発機構)
安藤 俊就(日本原子力研究開発機構)
佐藤 正泰(日本原子力研究開発機構)
清水 勝宏(日本原子力研究開発機構)
川島 寿人(日本原子力研究開発機構)
濱松 清隆(日本原子力研究開発機構)
高橋 幸司(日本原子力研究開発機構)
橋爪 秀利(東北大学)
山崎 耕造(名古屋大学)
中西 秀哉(核融合科学研究所)
西村 新(核融合科学研究所)
久保 伸(核融合科学研究所)
田島 輝彦(核融合科学研究所)

板で凝結した液体が重力により液体金属溜に戻る。図 3.2.1(b)は強制循環方式である。循環ポンプにより常にダイバータ対抗材の液体金属量を一定に保つ。ただし高速流である必要はないので電磁流体力学的力は弱いはずである。循環ポンプは自然循環では液体金属の戻り量が足りないときに用いる。ダイバータ対抗壁が横を向く場合や、下を向く場合などは、液体金属が落下しないように表面張力を利用してウィック（細管や網、スポンジなど液体を含ませるもの）から液体金属をしみ出させる⁽³⁾。この場合は循環ポンプで圧力をかけてしみ出し量を増加させることで、より高い熱流束に対抗できる。

蒸発による冷却量を見積もる。例えば、 α 加熱総量（750 MW）全てがリチウム蒸発で冷却するとすれば、リチウムの蒸発潜熱は 2.273×10^7 J/kg であるので、33 kg/sec のリチウムが蒸発する。蒸気発生場所での圧力は約 10^4 Pa となる。スリットを通して逃げた粒子の角度分布がコサイン分布とすると、差動排気後、約 60 g/sec のリチウムがプラズマ室に入る。ダイバータで排気されるためプラズマに入るのはさらに少ない量であるので、蒸発冷却で蒸発したリチウムがプラズマに大きな影響を与えるとは思えない。

要するに、ダイバータ板での高熱流束を液体金属の蒸発冷却で受け止めることが可能である。金属蒸気を大面積の冷却板で凝縮させることで蒸気圧を下げ、ダイバータレグの幅が狭いことを利用して開口部を狭くし、さらに差動排気を利用することで、プラズマ中に逆流する金属蒸気量を著しく減らす。これによって、磁気プラズマ閉じ込め装置の連続運転を可能とし、さらには磁気閉じ込め核融合炉の実用化上の難問を解決できると思われる。

しかし基礎実験が米ロで電子ビームなどを用いて行われているだけなので、本邦での高収束 NBI を用いた試験研究が望まれる。

参考文献

- (1) J. Wesson : Tokamaks 3rd edition, Oxford University Press, UK (2004).
- (2) M. A. Abdou, The APEX TEAM, A. Ying, N. Morley, K. Gulec, S. Smolentsev, M. Kotschenreuther, S. Malang, S. Zinkle, T. Rognlien, P. Fogarty, B. Nelson, R. Nygren, K. McCarthy, M. Z. Youssef, N. Ghoniem, D. Sze, C. Wong, M. Sawan, H. Khater, R. Woolley, R. Mattas, R. Moir, S. Sharafat, J. Brooks, A. Hassanein, D. Petti, M. Tillack, M. Ulrickson and T. Uchimoto : "On the exploration of innovative concepts for fusion chamber technology", Fusion Engineering and Design, Vol. 54, No. pp.181-247 (2001).
- (3) R. Majeski, S. Jardin, R. Kaita, T. Gray, P. Marfuta, J. Spaleta, J. Timberlake, L. Zakharov, G. Antar, R. Doerner, S. Luckhardt, R. Seraydarian, V. Soukhanovskii, R. Maingi, M. Finkenthal, D. Stutman, D. Rodgers and S. Angelini : "Recent liquid lithium limiter experiments in CDX-U", Nuclear Fusion Vol. 45, pp.519-523 (2005)
- (3) V. A. Evtikhin, I. E. Lyubinski, A. V. Vertkov, S. V. Mironov, V. B. Lazarev, N. P. Petrova, S. M. Sotnikov, A. P. Chernobai, B. I. Khripunov, V. B. Petrov, D. Yu. Prokhorov and V. M. Korzhavin : "Lithium divertor concept and results of supporting experiments", Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 44, pp.955-977 (2002)
- (4) 長山好夫 : 「高熱流束対応液体金属ダイバータシステム」, 電気学会プラズマ研究会資料, PST-07-38 (2007).

[文責：長山 好夫（核融合科学研究所）]

4. ST における運転制御

4.1 立ち上げ

核融合材料を DT 中性子を用いて照射試験することができかつ同時に ST の特性実験も行える Component Test facility (CTF) や ST 核融合炉ではセンターソレノイド (CS) を設置するスペースがほとんどない。従って、CS なしでプラズマ電流をスタートし、ランプアップさせる技術は ST 開発にはきわめて重要である。現在 (1) NSTX の Coaxial helicity injection (CHI) 実験で行われているような電極を挿入してプラズマ電流を立ち上げる方法⁽¹⁾, (2) LATE で行われているような EBW を一定垂直磁場に入射してプラズマ電流を形成し、パワーを増大して電流駆動によってプラズマ電流をランプアップさせる方法⁽²⁾, (3) RF パワーと同時に垂直磁場を印加して、磁束を入れ、RF パワーによるプラズマが外側に広がるのを垂直磁場で抑え平行を保ちながらプラズマ電流をスタートさせかつランプアップさせる方法が研究されている⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。(4) さらに MAST においては ECRH と誘導電場によって上下 2 カ所にプラズマ電流を作りマージングさせるマージング立ち上げ実験が行われている⁽⁷⁾。

方法 (1) は電極放電を用いるために不純物が混入する可能性が高く、炉に使用できるかどうか不明である。(2) は最近 20 kA までプラズマ電流駆動されており、以前よりも遥かに有望な方法になってきた。LATE はそのための実験だけに特化した装置であり、マシンタイムも存分にあるからであろう。(3) は JT-60U, TST-2 で実験が行われそれぞれ 100 kA, 10 kA 程度まで比較的大きなプラズマ電流をスタートアップさせることができるが、フラットトップにした結果はまだ示されていない。JT-60U 実験では実験初日からプラズマ電流をすぐに立ち上げることができたが、それは本方法が簡単でかつ再現性もよいからだと考えられる。現在、記録が伸びていないのは実験を行っていないからであり、滞っているのは実験回数が圧倒的に少なく、最適化を行う時間がないからであろう。また、フラットトップが得られていないのは、プラズマ平衡のための垂直磁場と立ち上げに要する垂直磁場のマッチングがとれていないことにあると考えられる。QUEST でこの実験ができるかどうか検討中である。

このような状況で、NSTX でプラズマ電流の HHFW の RF パワー入射によるランプアップが試みられた。これはオーミックで 200 kA 程度を立ち上げて、RF を印加するものであるが、有意なランプアップは残念ながらまだ観測されていない⁽⁷⁾。オーミック電流を一定（オーミック電流クランプ実験）にして RF を印加する実験も試みられたが、オーミック電流をクランプするとプラズマ断面が収縮し、アンテナとの結合が悪くなるなどの結果のために有意なランプアップはまだ観測されていない。この種の実験はすでに JT-60U で行われ成果が上がっているが⁽⁸⁾、NSTX では成果はまだ上がっていない。これは多分 ST のトロイダル磁場が高アスペクト比の

通常のトカマクよりも小さいからではないかと推測されているが⁽⁹⁾、推測の域を出ていない。NBI 入射実験はプラズマ電流が小さいと高エネルギー粒子の閉じ込めが悪いので、大電流で行う必要があるが、まだ詳しく行われたことはない。この場合プラズマ電流を一定にするフィードバック制御はスイッチオフしておかなければいけない。

最近では全般的に足踏み状態のプラズマ電流立ち上げ研究の状況を鑑み、CTF の物理設計を行っている立場から、プラズマ電流スタートアップには何が一番効果的かを NSTX グループの研究者と真剣に議論した結果、直径 10cm 程度の小型鉄心を ST のトロイダルコイルの中心部に設置し、プラズマ電流を生成することを考えることになった⁽¹⁰⁾。実際、ST における小型鉄心の採用は西尾によって最初提案されたが⁽¹¹⁾、その後真剣に検討されたことはなかったからである。

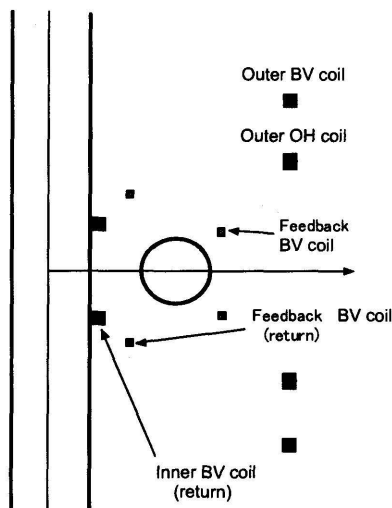


図 4.1.1 STOR-M トカマクにおける外側 OH コイル配位と垂直磁場コイル位置⁽¹³⁾

鉄心は TM-3 に始まるトカマク研究の隆盛の一要因であった。それは鉄心の結合の良さを利用して小さい電源で大きなプラズマ電流を生成できたからであり、シンプルなコイル構造で研究室レベルで比較的手軽にトカマク実験ができたからである。しかし鉄心はその飽和現象のために核融合炉のような長時間パルスが必要とする状況では次第に利用されなくなりつつある。鉄心はヒステリシスや飽和のある非線形材料であるために、鉄心を飽和させる利用法は実は難しくなる。筆者はカナダ・サスカチュワン大学の STOR-1 M 鉄心トカマクの設計製作中に、鉄心トカマクの特性について理論的、実験的に徹底的に調べ、次のような知見を得た⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

- (1) 鉄心の境界で磁力線は垂直に交わる境界条件によって、鉄心が無い場合に比していわゆるイメージ磁場が追加される。
- (2) 一次コイル電流が増加し鉄心が飽和すると、このイメージ磁場は消え、一次コイルは空芯コイルとなる。
- (3) 非誘導電流駆動を行うと鉄心は、一次コイル電流増加による鉄心飽和と逆方向に励磁され飽和する。これらを考慮

し CTF に小型鉄心を利用すべく理論的、実験的研究が開始された。

そのために、まずカナダ・サスカチュワン大学の STOR-M 鉄心トカマク ($R=46\text{cm}$, $a=12\text{cm}$, $B_t=1\text{T}$, $I_p=20\text{ kA}$) において理論的、実験的研究を行うことにした。長年国際共同研究を行ってきたこともあり、2007 年 6 月の学会参加の際に、CS のない ST のコイル配位に変更してプラズマ電流生成を試みた。すなわち、図 4.1.1 に示すように従来設置していた鉄心上のオーミックコイルを回路から切断し、プラズマの外側におかれたオーミックコイルのみでプラズマ電流生成を試みた。

このコイル配位は今までの伝統的な配位とは異なるものであり、だれも試したことはなかった。実験の前に回路シミュレーションを行って、その結果を基に実験を行った。その結果、最初の第一ショットからプラズマ電流が得られ、放電洗浄とともにプラズマ電流は増大し、計算値とほぼ同様の 10 kA が得られた。巻き数を半分にしたためにプラズマ電流が半分になる予測結果と同じであった。プラズマの外側に一次巻き線をおいても、初期バイアスに必要なコイル電流が小さく、その結果漏れ磁場は 4 G 程度と小さく、それもほぼ一様に分布するために、プラズマ生成空間の全面にわたってヌル点に近い領域が形成されているからである。このとき、プラズマ平衡をとる垂直磁場は巻き戻しを有する垂直磁場コイルとフィードバックコイルによっても制御されている。将来は鉄心を飽和させてもプラズマ電流が維持できるか、平衡がとれるかの実験を行う予定である。

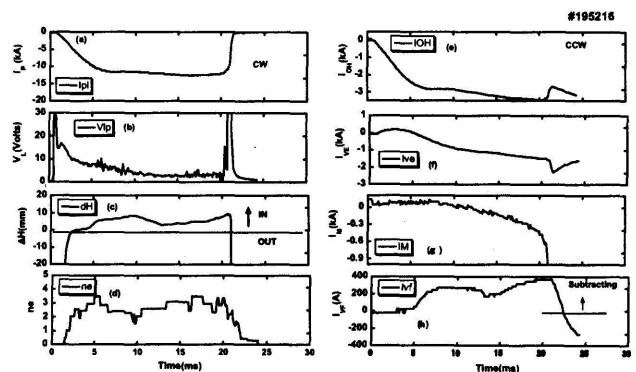


図 4.1.2 STOR-M トカマクにおける外側 OH コイルを用いたプラズマ電流スタートアップ実験 (a) Plasma current, (b) the loop voltage, (c) plasma position, (d) the line average density, (e) the outer OH coil current, (f) the vertical coil current, (g) the magnetizing current in the iron core, and (h) B_v feedback coil current.⁽¹³⁾

このようにきわめて簡単に鉄心付き ST コイル配位でプラズマ電流がスタートアップできることが実験的にも理論的にも明らかになった⁽¹⁴⁾。しかしながら CTF に本方法を採用する場合、300 kA 程度の初期プラズマ電流の生成は容易であるが、その後鉄心が飽和し、さらに非誘導駆動を併用すると、鉄心が逆方向に飽和したりするので詳細な解析が必要である。また鉄心の非飽和、飽和前後で磁気面の形状が変化する

るのでそのための制御も必要になってくる。このように鉄心によって初期プラズマ電流のスタートアップは非常に簡単になるが、その後の制御には十分に注意しなければならず、今後の詳細な解析が必要である。

参考文献

- (1) R. Raman, D. Mueller, T.R. Jarboe, B.A. Nelson, M.G. Bell, M. Ono, T. Bigelow, R. Kaita, B. LeBlanc, K.C. Lee, R. Maqueda, J. Menard, S. Paul and L. Roquemore: "Non-inductive solenoid-less plasma current startup in NSTX using transient CHI", Nucl. Fusion **47**, No 8, pp.792-799 (2007)
- (2) 前川 孝, 平成 9 年度双方向研究報告会, 2007.1.24 at NIFS.
- (3) O. Mitarai: "Inductive Plasma Current Start-up by the Outer Vertical Field Coil in a Spherical Tokamak I", Plasma Physics & Controlled Fusion **41** pp.1469-1483 (1999).
- (4) Y. Takase, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, S. Ide, S. Itoh, Y. Kamada, T. Maekawa, O. Mitarai, Y. Miura, Y. Sakamoto, S. Shiraiwa, T. Suzuki, S. Tanaka, T. Taniguchi, K. Ushigusa, JT-60 Team: "Plasma Current Start-up, Ramp-up, and Achievement of Advanced Tokamak Plasmas without the Use of Ohmic Heating Solenoid in JT-60U", Journal of Plasma and Fusion Research **78**, No.8, pp.717-718 (2002)
- (5) O. Mitarai, Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, H. Kasahara, T. Yamada, S. Ohara, TST-2 Team, K. Nakamura, A. Iyomasa, M. Hasegawa, H. Idei, M. Sakamoto, K. Hanada, K. Satoh, H. Zushi, TRIAM Group and N. Nishino: "Plasma Current Start-up by ECW and Vertical Field in the TST-2 Spherical Tokamak", Journal of Plasma and Fusion Research, **80**, No.07 pp.549-550 (2004)
- (6) A. Sykes, J.-W. Ahn, R. J. Akers, E. Arends, K.B. Axon, R.J. Buttery, C. Byron, P.G. Carolan, D. Ciric, N.J. Conway, M. Cox, G. Cunningham, A. Darke, J. Dowling, M.R. Dunstan, A.R. Field, S.J. Fielding, S. Gee, M.P. Gryaznevich, R. J. Hayward, P. Helander, M. B. Hood, A. Kirk, I.P. Leane, B. Lloyd, G.P. Maddison, S.J. Manhood, R. Martin, G.J. McArdle, H. Meyer, M. Magrath, A.W. Morris, M.P. Nightingale, T. Pinfold, M.N. Price, C. Ribeiro, D. C. Robinson, V. Shevchenko, K. Stammers, A. Tabasso, D. Taylor, M.R. Tournianski, M. Valovic, G. Voss, M.J. Walsh, S. E. V. Warder, H.R. Wilson, the MAST and NBI Teams: "Results from the MAST Spherical Tokamak", 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE), (Atlantic City, USA, January 22-25, 2002)
- (7) G.F. Counsell, R.J. Akers, L.C. Appel, D. Applegate, K.B. Axon, Y. Baranov, C. Brickley, C. Bunting, R.J. Buttery, P.G. Carolan, C. Challis, D. Ciric, N.J. Conway, M. Cox, G. Cunningham, A. Darke, A. Dnestrovskij, J. Dowling, B. Dudson, M.R. Dunstan, E. Delchambre, A.R. Field, A. Foster, S. Gee, M.P. Gryaznevich, P. Helander, T.C. Hender, M. Hole, D.H. Howell, N. Joiner, D. Keeling, A. Kirk, I.P. Leane, S. Lisgo, B. Lloyd, F. Lott, G.P. Maddison, S.J. Manhood, R. Martin, G.J. McArdle, K.G. McClements, H. Meyer, A.W. Morris, M. Nelson, M.R. O'Brien, A. Patel, T. Pinfold, J. Preinhaelter, M.N. Price, C.M. Roach, V. Rozhansky, S. Saarelma, A. Saveliev, R. Scannell, S. Sharapov, V. Shevchenko, S. Shibaev, K. Stammers, J. Storrs, A. Sykes, A. Tabasso, S. Tallents, D. Taylor, M.R. Tournianski, A. Turner, G. Turri, M. Valovic, F. Volpe, G. Voss, M.J. Walsh, J.R. Watkins, H.R. Wilson, M. Wisse and the MAST, NBI and ECRH Teams: "Overview of MAST results", Nucl. Fusion **45**, No 10, pp.S157-S167 (2005)
- (8) M. Ushigome, S. Ide, S. Itoh, E. Jotaki, O. Mitarai, S. Shiraiwa, T. Suzuki, Y. Takase, S. Tanaka, T. Fujita, P. Gohil, Y. Kamada, L. Lao, T. Luce, Y. Miura, O. Naito, T. Ozeki, P. Politzer, Y. Sakamoto and the JT-60U Team: "Development of completely solenoidless tokamak operation in JT-60U", Nucl. Fusion **46**, No 2, pp.207-213 (2006)
- (9) C. Kessel, private communications, 2007 March at PPPL.
- (10) O. Mitarai: "Analyses of Plasma Current Ramp-up and Ignition in CTF", to be submitted. (2008).
- (11) S. Nishio, M. Sato, K. Tobita, and Y. Nakamura: "Operational Flexibility of CS-less Tokamak Reactor", 15th International Toki Conference on Fusion and Advanced Technology (ITC-15, Dec. 6-9. 2005) RD1-3.
- (12) O. Mitarai, S.W. Wolfe, A. Hirose and H. M. Skarsgard: "Measurements of the Image Field in the STOR-1M Tokamak", Plasma Physics and Controlled Fusion, **27**, p.395 (1985).
- (13) O. Mitarai, and A. Hirose: "Current Drive Operations in a Tokamak", Journal of Fusion Energy **4**, p.395 (1985).

- (14) O. Mitarai, C. Xiao, D. MaColl, M. Dreval, A. Hirose, and M. Peng: "Plasma current start-up by the outer vertical field coil in the iron core STOR-M tokamak for CTF I", in The 13th ISTW, (October, 2007).

[文責: 御手洗 修 (九州東海大学)]

4.2 ブートストラップ電流と β 限界

ST のプラズマ電流はトカマクに比べて大きい, 中心柱のスペースが限られているため充分な OH 駆動磁束を得ることは困難である。しかし, ST 炉では高 β 性能を生かしてプラズマ電流の大部分をブートストラップ電流でまかなうことが可能である。そこで高ブートストラップ電流配位が MHD 安定かどうかを調べなくてはならない。本稿で紹介するのは, ARIES-ST 設計において行われた, 高ブートストラップ電流, 高 β での計算である⁽¹⁾。

高ブートストラップ電流での理想 MHD 安定性解析⁽²⁾⁽³⁾では, JSOLVER コードや TOO コードなどの固定境界平衡コードにおいて, 磁場に平行な電流成分がブートストラップ電流に一致するようにする。ブートストラップ電流は Hirshman モデル

$$\langle J \cdot B \rangle_{BS} = \mu_0 g(\psi) f p' \quad (4.2.1)$$

を用いている⁽³⁾。ここで ϕ は磁束関数, $g(\phi)$ は Hirshman の係数⁽⁴⁾, f , p は Grad-Shafranov 方程式の関数である。ただし, 中心部に流れるブートストラップ電流のシード電流は

$$\langle J \cdot B \rangle_{CD} = C_2 \left[1 - \tanh \left(\frac{\psi - \psi_0}{\Delta \psi} \right) \right] \quad (4.2.1)$$

とする。ここで C_2 は与えられた $q(0)$ が得られるように決める。したがってブートストラップ電流比 (f_{BS}) は 100% とはならず 99% となる。用いた平衡配位の例⁽¹⁾を図 4.2.1 に示す。このように, シード電流は電流駆動が与えると仮定する。平衡配位を BALOON コードや BALOO コードなどのバルーニングモード解析コードや PEST-II コードや GATO コードなどのキンクモード解析コードで β 限界や導体壁の位置を計算する。

得られた結果は以下のようなものである。図 4.2.2 に理想的低 n 不安定性であるバルーニングモードによる β 限界のアスペクト比依存性を示す。これは, 文献[3] (◇) の Fig.15 と Fig.16 をベースに, 文献[2] (□) での Fig.4 をプロットしたものである。文献[3]では $q(0)=3$, $\delta=0.45$, 文献[2]では, $\kappa=2.8$, $A=1.4$ で, どちらもブートストラップ電流比 (f_{BS}) がほぼ 100% の場合の計算である。重要な点は, 第一に楕円度 (κ) を上げることに伴って規格化 β (β_N) が上がりその結果トロイダル磁場に対する β 値が上がる, 第二に最適なアスペクト比には下限 ($A=1.4$) があることである。

理想的低 n 不安定性 (キンクモード) は導体壁で安定化する。 $A=1.4$ の場合の低 n キンクモードの安定化に必要な導体壁の位置を, 異なる三角度 (δ) の場合について図 4.2.3 に示す。ただし楕円度が上がるにつれて導体壁はプラズマに