小特集

ベータ値限界と MHD

3. ヘリカルプラズマにおける到達ベータ値の進展

渡 邊 清 政
(核融合科学研究所)

Progress of Experimentally Achieved Beta Values in Helical Plasmas

WATANABE Kiyomasa Y.
National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan
(Received 27 November 2002)

Abstract

The recent dramatic progress in the study of helical systems related to achieving high beta plasmas is reviewed. Discharges with over 3% beta plasmas have been achieved in LHD and W7-AS experiments. Although MHD instabilities affect pressure gradients as a local effect, high beta plasmas have been achieved in a fairly stable region according to ideal MHD stability analysis. Heating power and/or radiation phenomena were shown to still limit the experimental beta values. Magnetic surfaces with good quality are considered to exist even in over 3% beta plasmas. The issues involved in achieving more than 5% beta plasmas are summarized.

Keywords:

helical system, heliotron, beta limit, MHD stability, density limit, LHD, W7-AS

3.1 はじめに

ヘリカルシステムは外部コイルだけで閉じ込め磁場の生成が可能なので、定常運転が容易、電流崩壊による急激な磁気エネルギー、熱エネルギーの解放が起こらない、電流駆動に代表される大きな還流エネルギーが不要、等の観点から定常熱核融合炉として有望なトラス磁場閉じ込め装置の一つである。現在稼働中のヘリカルシステムは磁気軸の形状から、「平面磁気軸配位」と「立体（あるいはヘリカル）磁気軸配位」の2つに分類することができる。平面磁気軸配位は主に連続巻きコイルにより実現され、LHD[1]やCHS[2]といったヘリオトロン配位の装置がその代表である。一方、立体磁気軸配位は磁気軸の軌跡がヘリカル形状をしており、主にモジュラーコイルにより実現され、現在稼働中の装置としては、W7-AS（ドイツ[3]）、TJ-II（スペイン[4]）、HSX（アメリカ[5]）、Heliotron-J（京都大学[6]）等があげられ

author's e-mail: kiyowata@LHD.nifs.ac.jp

る。立体磁気軸配位は装置としての自由度が高く、コアプラズマの最適化とコイル設計を切り離す手法とが開発されて以来、各種の最適化概念に基づいた装置が提案されている[7]。

ヘリオトロン配位における MHD 不安定性とベータ限界については、理想交換型不安定モードを中心とした理論および実験にわたる解説が本紙記事「ヘリオトロン/トルサトロンにおける MHD 不安定性」において、1990年当時の研究の成果と進展をもとに詳しくなされている[8]。当時、ヘリカルシステムの主な実験装置として、HeliotronE[9]、ATF[10]、CHS、W7-AS が稼働しており、到達ベータ値としては、HeliotronE で1985年に達成された $\langle\beta\rangle = 2\%$ が最高値だった[11]。その後のヘリカルシステムにおける高ベータ実験の主な進展を Fig. 1 に示す。1994年に CHS で HeliotronE を超えるベータ値(2.1%)が達成された[12]。LHD で実験が開始されると、到

Fig. 1 Progress of experimentally achieved beta in Helical devices.

達最高ベータ値が更新され、2001年には3.2%が達成された[13]。一方、W7-ASでは、ダイバータ改造後、3%を超えるベータ値が達成され、2002年には3.4%が達成されている[14]。次に理論的な進展について触れる。1990年当時、主なMHD平衡、安定性解析には、ある種の平均化法に基づいた線形理想MHD計算コード(H-APPOLO, H-ERATQ[15], STEP[16]等)を用いるのが主流であり、3次元平衡解析コードVMEQ[17]の利用が普及し始めつつあった。その後、VMECコードはその使いやすさと信頼性の高さからヘリカルシステムでの平衡解析の標準コードとなり、現在では、装置設計にはもちろん、有限ベータでの実験解析になくはならないものとなっている。また、HINT[18]を代表とする磁気面が存在しない場合のMHD平衡を解析するコードの開発と運用実績が進み、実験解析への適用が進みつつある。MHD安定性解析について言えば、3次元線形理想MHDコードの開発が進み、系統的な実験解析への適用が進んでいる。ヘリカルシステムに対するバルーニングモード解析についても進展があり、3次元形状に特有なバルーニングモードの存在が明らかになった[19]。これらの理論的な進展については本紙の講座[20]や他の文献に譲るとして、本章では、最近高ベータが達成されたLHDとW7-ASの実験結果を中心に高ベータ放電のMHD平衡、安定特性及び運転条件について述べる。本章の構成は以下になっている。まず、3.2節でLHDとW7-ASのMHD特性について概説する。3.3節と3.4節でそれぞれ高ベータにおけるMHD安定特性と平衡特性に関する実験結果を紹介する。3.5節で、高ベータ運転ための運転条件と閉じ込め特性の関係を示し、3.6節でまとめと今後の高ベータ化への課題、展望を示す。

3.2 ヘリカルシステムのMHD特性

ヘリオトロン配位であるLHDと立体磁気軸であるW7-ASは高ベータにおけるMHD平衡、安定性特性が異なるので、それぞれの装置のMHD特性について概説する。

ヘリオトロン配位は当初、HeliotronEに代表される強い磁気シアと高い回転変換でプラズマを安定に閉じ込める方式で実験が進められた。HeliotronEでの高温プラズマ保持成功を受け、MHD安定特性をさらに向上させた適度な磁気シアと適度な回転変換をもつ方式が考案された。LHD(主半径3.9 m, 小半径0.6 m)は後者の方式の代表である。ヘリオトロン配位は、直線ヘリカル配位をトーラス状に曲げた配位であるので、本質的に磁気丘領域を持つ。有限ベータ時にシャフラノフシフトが起こると、トーラス効果により磁気軸付近は磁気井戸配位になる。磁気井戸はシャフラノフシフトが大きいほど深くなる。一方、周辺は依然として磁気丘であるが、周辺は中心に比べ回転変換が強くシャフラノフシフトが小さいので、強い磁気シアが形成される。回転変換と磁気シアを適度を選ぶことにより有限ベータでコア領域の磁気井戸と周辺の磁気シアを制御し、MHD安定性を向上させる。一方、適度な回転変換を選ぶことにより、平衡ベータ限界値と安定ベータ限界値がほぼ一致するようになり、平衡特性と安定特性の両立が計られる。シャフラノフシフト量は圧力勾配(分布)、トロイダル電流に大きく影響を受ける。特に、コア領域でその傾向が顕著である。Fig. 2はLHDの磁場配位(真空での磁気軸の位置、 R_{ax}^V)を変えた時の低 n 理想MHD安定領域の変化の様子を示している。Fig. 2(a)はコア領域の低次の有理面($t=1/2$)に対応する低 n モード($m/n=2/1$)に対しており、(b)は周辺付近の低次の有理面($t=1$)に対応している。破線、一点破線、実線はそれぞれ尖塔化した圧力分布、広がった圧力分布、その中間の圧力分布を仮定した場合の結果を表している。コア領域では磁気軸が $R_{ax}^V=3.6$ mよりトーラス内寄せ配位で不安定領域が現れる。 $R_{ax}^V=3.6$ m付近が不安定性が現れる境界で、その境界は圧力勾配により影響を受ける。一方、周辺付近では圧力分布により不安定領域はほとんど影響を受けない。また、コア領域ではいったん理想モードが不安定になってもベータが上がると再び低 n 理想MHDモードは安定になるが、周辺付近はベータがある値を超えるとベータが高くなるほど低 n 理想MHDモードは不安定になると予測される。このような振る舞いは中程度の磁気シアと回転変換をもった他のヘリオトロン配位で共通の特徴である。

Fig. 2 Low-n stability boundary of ideal MHD mode in LHD with various magnetic axis positions. (a) $m/n = 2/1$ mode (resonant rotational transform is $\iota = 1/2$) and (b) $m/n = 1/1$ ($\iota = 1$).

W7-AS(主半径2 m, 小半径0.2 m)はMHD安定性と平衡特性の向上を,それぞれ低磁気シア・磁気井戸とPS(フィルシュ・シュルター)電流(平衡電流)の最小化によりめざした先進ステラレータ配位の実験装置である。最適化が十分完了していない面もあり,配位により理想MHD不安定な領域が現れるが,基本的には磁気井戸配位でありMHD安定性能は高い。PS電流の最小化をめざし,古典的ステラレータに比べるとシャフラノフシフトは軽減しているが,後で示すようにベータが3%になるとかなりの磁気軸シフトが観測されている[21]。低磁気シアは低次の有理面がプラズマ中に存在することを避けるために採用されているが,ブートストラップ電流等のプラズマ電流で回転変換が変わると劇的に閉じ込め特性が変わる可能性がある[22]。

3.3 高ベータ実験とMHD安定性

3.3.1 LHD高ベータ実験におけるMHD安定特性

LHDの高ベータ放電は,主に閉じ込め特性は有利であるがMHD安定特性が不利な磁気軸トラス内寄せ配位で行われている。LHDは入射方向が時計回り方向に1台,反時計回り方向に2台の負イオン加速型NBIを持つ

Fig. 3 Dependence of confinement enhancement factor over the ISS95 scaling on beta in LHD [24].

ており,入射角度は磁場に対してほぼ平行である。典型的な入射エネルギーは $\sim 150 \text{ keV}$ で,入射パワーの最大は9 MWである[11]。高ベータ実験は主に0.75 T以下で行われ,NBIによるプラズマ生成が行われている。NBIによるプラズマ生成のため磁場強度の広い範囲にわたった実験が可能となっている。これまでの最高到達ベータ値は3.2%(ガスパフ+ペレット/ $R_{ax}^V = 3.6 \text{ m}$ 配位/0.5 T/ $n_e \sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)である[12]。Fig. 3はLHDにおけるISS95実験比例則[23]を基準にした閉じ込め改善度のベータ値依存性を示している。3%程度の高ベータ放電でMHDに起因する劇的な不安定性は観測されておらず,閉じ込め特性の劣化も見られない[24]。

LHDの高ベータ実験は閉じ込め特性の良い $R_{ax}^V = 3.6 \text{ m}$ 配位で主に行われているが,3.2節で示したようにLHDの $R_{ax}^V \sim 3.6 \text{ m}$ 配位では,コア領域のMHD特性が圧力分布により大きく変わる可能性がある。そこで,LHDでは共鳴有理面ごとに実験で達成された圧力勾配と線形理想MHD安定性の理論予測値の関係が系統的に解析されている。LHDはトムソン散乱計測による電子温度分布計測(空間計測点100以上)[25]をはじめとする強力な分布計測器を備えていることが,系統的解析を進める上で重要な要素となっている。Fig. 4(a)は $\rho = 0.5$ での達成圧力勾配のベータ値依存性を示している[26]。 $\rho = 0.5$ はおおよそ回転変換 ι が0.5となる小半径である。磁場強度は0.75 - 1.5 Tで $R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位のNBI放電に対する結果である。実線と破線はそれぞれ低 n 理想交換型モード(巨視的モード)とメルシエモード(局在化モード)の不安定境界を示している。低 n 理想交換型モードの安定性の解析には3次元線形理想MHD安定性解析コード(Terp-sichore[27])が使われている。白丸で示されている実験

Fig. 4 Evolutions of (a) pressure gradient at $\rho = 0.5$ and (b) amplitude of magnetic fluctuation with the resonance of 2/1 along with β_{dia} in LHD. Mercier unstable (dotted line) and low- n mode unstable regions (solid line) are illustrated in (a). The left central areas are unstable [26].

で得られた圧力勾配の上限を見ると、1.8%以下ではある境界を越えない。この境界は低 n モード ($m = 2/n = 1$, m : ポロイダルモード数 / n : トロイダルモード数) の不安定境界を少し超えているが不安定モードの成長率の等高線に沿っており、メルシエ安定な圧力勾配の約 3.5 倍に達している。一方、 $\langle \beta \rangle = 1.8\%$ 以上では実験で達成された圧力勾配の上限に特に制約は見られず、 $\langle \beta \rangle = 1.8\%$ 以下の 2 倍を超える圧力勾配が観測されている。以上より、低 n モードは圧力勾配にある制限を与えるが、メルシエ不安定性は圧力勾配に何の制限も与えていないように見える。Fig. 4(b)は磁気揺動の $m/n = 2/1$ モードのベータ依存性を示している。2/1 モードは $\langle \beta \rangle$ が 0.3% を超えた時現れ、その大きさはベータとともに増加する。2.3% 以上では 2/1 モードは観測されなくなるがこの領域はちょうどメルシエ不安定領域に対応している。観測された圧力勾配の上限が制約を受ける $\langle \beta \rangle > 1\%$ でベータに対する磁場揺動強度の増加率が小さくなる。2/1 モードは温度勾配に影響を与えるが、巨視的閉じ込めにはほと

Fig. 5 Evolutions of (a) pressure gradient at $r = 0.9$ and (b) amplitude of magnetic fluctuation with the resonance of 1/1 along with β_{dia} in LHD. Mercier unstable (dotted line) and low- n mode unstable regions (solid line) are illustrated in (a). The right upper areas are unstable [26].

んど影響を与えない。

Fig. 5(a)は磁気軸 3.6 m 配位における $\rho = 0.9$ での達成圧力勾配のベータ値依存性を示している[26]。 $\rho = 0.9$ はおよそ回転変換 t が 1 となる小半径である。磁場強度、磁場配位は Fig. 3 と同じである。実線と破線はそれぞれ低 n 理想交換型モードとメルシエモードの不安定境界を示している。ベータが $\sim 1.8\%$ 以上でメルシエ不安定、 $\sim 2.4\%$ 以上で低 n ($m/n = 1/1$) モード不安定と予測される。観測される圧力勾配はベータの増加するにつれ単調に増加する。最高到達圧力勾配は低 n 理想 MHD モード不安定境界領域にあり、周辺でも理想交換型モードが到達圧力勾配に制限を与えるか否かについては実証は 3% を超える高ベータ実験が必要となる。Fig. 5(b)は磁気揺動の $m/n = 1/1, 2/2, 3/3$ モードのベータ依存性を示している。磁場揺動はベータが 0 ~ 3% の間メルシエ安定領域でもずっと観測されつづけられる。この領域は磁気丘領域なので、高 m 抵抗性交換型モードはずっと不安定と予測され、観測された磁気揺動は抵抗性交換型不

安定性に起因している可能性が強い。

以上より、LHDではコア領域の圧力勾配がベータ値により変わることにより理想交換型モードが安定化され高ベータが達成されたと考えられる。

3.3.2 W7-AS 高ベータ実験における MHD 安定特性

W7-ASの最近の高ベータ実験は回転変換が1/2付近の相対的に高い回転変換配位で行われて、NBIで高ベータプラズマが維持されている[21]。NBIは高速イオンの閉じ込め特性が有利なように入射方向がすべて磁場と同じ向き(順方向)に設置されており、入射パワーは合計3.5 MWである。磁場強度は0.75~1.25 Tである。最高ベータ値3.4%は0.9 Tで達成され、その時の密度は $n_e \sim 2.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ である[14]。高ベータで大きなプラズマ体積が確保できるように、真空磁場配位としては磁気軸トラス内寄せ配位となっており、低ベータでのMHD安定特性は不利な配位で実験が行われている。

高ベータ放電では弱いMHD揺動のみが計測されている。相関の高いモードは周波数が低く、低次の有面付近で駆動される圧力駆動モードに起因すると考えられる。圧力勾配に起因するMHD揺動は2%以上の高ベータ時には観測されず、2%以下の中程度のベータ領域でのみ観測される。モード数は $m/n = 2/1$ で、ベータの増加とともに2/1モードの位置は小半径内側へとシフトする。実験データは安定性がベータが増加するにつれて安定性が改善されていることを示唆している。

高ベータ放電に関する理論計算との比較も最大ベータ値が $\langle\beta\rangle = 2.7\%$ のある放電に対してなされている。平衡計算結果によるとベータ値が上がるにつれて磁気シアなしの $t \sim 1/2$ の分布から $\rho \sim 0.6$ で回転変換が1/2を切るトカマク型の磁気シアに変わる。最外殻の回転変換が1/2を切るのは $\langle\beta\rangle = 0.9\%$ の時である。Fig. 6にメルシエ不安定領域と抵抗性交換型モード不安定領域を示す。低ベータではトラス内側シフト配位のためプラズマの広い領域でメルシエモードが不安定であるがベータの増加とともに磁気シアと磁気井戸が形成され、安定化されていくと予測される。これらの振る舞いは $m = 2$ の揺動が中間的なベータ領域で不安定で、 $\langle\beta\rangle > 2\%$ を超える高ベータ領域では観測されないという実験結果と一致している。低 n モードに関する理想MHDモードの安定性解析は、圧縮性の効果を考慮したCAS3Dコード[28]で行われた。その結果、不安定な低 n モード($m = 2/1$)はモード構造が小半径方向に広がり、かつ外部モードの性質が強いものであった。その成長率はベータとともに単調に減少し、実験結果とも定性的な一致を示している。高 n

Fig. 6 Evolutions of Mercier and resistive interchange criteria for an equilibrium sequence referring to the case of $B=1.25$ T and $\iota(a)=0.52$ in W7-AS [21].

のバルーニングモードに関しても解析がおこなわれており、ベータ値が2%以下と低い場合は周辺で不安定と予測されるがこれも2%を超える高ベータ領域では安定となる[21]。

3.3.3 過渡状態における理想交換型 MHD 安定性特性

LHD, W7-ASの実験結果で見えてきたように、ある程度定常に達成された高ベータ領域において、圧力勾配の運転領域に制約があるが、低 n の理想交換型モードが不安定な状態になっているわけではない。しかしながら、W7-ASの解析に見られるように過渡状態として低 n 理想MHDモードが不安定な状態がある。その時、MHD揺動は大きくなるが、直ちに大きな崩壊(圧力勾配やプラズマ蓄積エネルギーの減少)にはつながらない。LHDでは、ベレット入射後の密度分布が尖塔化し、密度、プラズマ蓄積エネルギーが減少していく時間帯で鋸歯状振動が観測されている[29]。しかしながら、内部崩壊には至らない。その時の低 n 理想MHD安定特性を調べてみると、ガスパフで到達している圧力勾配より高い圧力勾配が(Fig. 4(a)中の斜線部領域)達成されている。これらの結果は、定常的には低 n 理想MHD不安定を超えることはできないが、過渡的には、超えることが可能なことを示唆していると考えられる。一方、HeliotronEでは、圧力駆動型抵抗性不安定モードに起因する考えられる鋸歯状振動と内部崩壊がベータ値1%以上で観測されたとの報告がある。LHD実験では、磁気レイノルズ数がHeliotronEの実験条件に比べて2オーダー程度大きく[30]、コア領域では理想交換型不安定性が支配的なため、HeliotronEで観測された内部崩壊が観測されていない可能性がある。

3.4 高ベータ運転とMHD平衡

高ベータ領域でのMHD平衡の存在はヘリカルシステムにおいて大きな問題の一つである．HINTのような磁気面を仮定せずに有限ベータでの平衡を解析するコードの計算結果によると，ヘリカルシステムではPS電流により磁気面がエルゴディックになったり，磁気島が形成されたりすることにより，高ベータでの閉じ込め性能が劣化することが予測されている．しかしながら，磁気面がどの程度乱れると実験的に高温のプラズマが閉じ込められなくなるかは難しい問題であり，理論予測と実験結果を比較することが重要となってくる．

W7-ASでは，X線トモグラフィを使って高ベータ放電での磁気面を計測している（プラズマパラメータが磁気面上で一定，X線強度は磁気軸から離れるに従い単調に減少すると仮定し，X線強度の等高線が磁気面と一致していると考え）．Fig. 7に8個のカメラを用いたX線計測によるX線強度の等高線の2次元像と3次元MHD平衡解析コード（VMEC/NEMEC[31]）による計算結果を示す[14]．Fig. 7左が $\langle\beta\rangle \sim 0.7\%$ ，右が $\langle\beta\rangle \sim 3.1\%$ の場合に対応する．VMEC/NEMECは，磁気面の存在を仮定して平衡を計算するコードであるが，実験結果とかなりの良い一致を示している．この場合最外殻での回転変換が $f(1) \sim 0.5$ で，W7-ASとしては比較的高回転変換の配位であるが，3.1%では，トロイダル方向に平均して小半径の40%弱のシャフラノフシフトが観測されている．一方，LHDでも軟X線のCCD映像計測に基づき磁気軸のシフトを計測しており， $\langle\beta\rangle \sim 2.5\%$ で，30 cm近い（小半径で規格化した値が50%近い）シャフラノフシフトが観測されている[32]．W7-AS，LHDでの温度，密度分布計測によると広い領域で勾配が存在する[14, 30]ので，3%近い高ベータでプラズマを閉じ込めるのに十分な質の「磁気面」が存在していると考えられる．

3.5 高ベータ運転条件と閉じ込め特性

実験的に高ベータ放電を達成するには運転条件の最適化が重要である．特に磁場強度の選択と加熱条件，運転密度が重要となってくる．到達予測ベータ値はISS95閉じ込め比例実験則を仮定すると，

$$\langle\beta\rangle \propto f_H n_e^{-0.51} P^{0.41} B^{-1.17} a^{0.21} R^{-0.35} f^{0.4}$$

となる．ここで， f_H は閉じ込め改善度である．この式から，高ベータを達成するには，加熱パワー P ，密度 n_e ，閉じ込め改善率を上げるか，磁場 B を下げればよいことがわかる．中でも磁場を下げるのがもっとも有効である

Fig. 7 Comparison of X-ray tomograms for a shot ($\epsilon(a)=0.52$) at low and high beta compared with flux surfaces calculated by NEMEC (dashed line: axis position of the vacuum configuration) [14].

が，低磁場過ぎるのはよくない．通常，高ベータ実験はNBI加熱を使って行われる．トーラス型磁場閉じ込め装置ではNBIにより生成された高エネルギー粒子の閉じ込め特性が磁場が小さくなると悪くなる．また，密度の上昇により高速イオンの生成位置がプラズマ周辺に移動し，高エネルギー粒子の損失を増大させる．ヘリオトロニ配位における到達可能なベータ値予測を高エネルギー粒子の損失の効果を考慮した数値計算に基づいて村上らが行っている[33]．密度一定で，NBIの加熱効率の磁場依存性を調べ，ある磁場強度以下($B < 0.5$ T)で急激に加熱効率が減少することを示しており，CHSの実験結果と良い一致を示している．NBIの加熱の最適化から最低磁場条件が決まる．NBIの入射条件については，順方向入射の方が逆方向入射に比べて加熱効率が良く，その違いは低磁場ほど大きいので，W7-ASではすべてのNBIの入射角を順方向入射に変えている[21]．一方，運転密度の増加も到達ベータ値の上昇につながるが，到達可能な密度には限界がある（密度限界）．密度限界は加熱入力と放射損失のバランスにより決まると考えられ，密度限界(n_c)はLHD実験比例則[34]によると，

$$n_c \propto P^{0.5} B^{0.5} a^{-1} R^{-0.5}$$

で与えられる．W7-ASでは，高ベータ運転が $2.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ と高い密度で達成されているが，LHDの運転密度は $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と小さい．これは，密度限界が体積の1/2乗に反比例するからである．密度を上げる観点から言えば，大型装置での高ベータ運転は難しいが，LHDでは，トーラス内寄せ配位における閉じ込め改善($f_H \sim 1.5$)と加熱パワーの増大により高ベータ運転が可能となった．一方，W7-ASでは，ダイバータ板を設置することにより，密度が高い領域で良好な閉じ込めモード

(HD-H モード [35]) が出現し、高ベータ運転が達成されている。

3.6 まとめと今後の展望

ヘリカルシステムの達成ベータについては最近大きな実験的進展が LHD と W7-AS においてなされた。共にベータ値として 3% を超える放電が達成され、閉じ込めを急激に劣化させるような MHD 揺動は観測されていない。依然として、達成ベータ値の上限は加熱能力や放射崩壊等により制限されているように見える。LHD, W7-AS とともに加熱パワーの増強や放射崩壊の制御による密度限界の向上によりベータ値はさらに増加すると期待できる。

しかしながら、核融合炉を想定した場合、経済性等の観点から、 $\langle\beta\rangle \sim 5\%$ が炉の条件として要求される。LHD の建設目的は「ヘリカル方式の炉心のための物理的・工学的課題を解明すること」でベータ値に関する課題としては「平均ベータ 5% 以上の高ベータプラズマの実現とその物理的研究」があげられている [36]。LHD における平均ベータ値 5% を達成する条件は、ISS95 を仮定すると、磁場強度 0.5 T 運転で密度 $n_e \sim 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 加熱パワー 10 MW, 閉じ込め改善度 $f_H = 1$ であり、0.75 T 運転で $n_e \sim 7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} / 15 \text{ MW} / f_H = 1$, もしくは $n_e \sim 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} / 10 \text{ MW} / f_H = 1.5$ である。この時、LHD 実験比例則による臨界密度限界はそれぞれ、 $4.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $6.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $5.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であるので、どのくらい高い密度まで良好な閉じ込め性能を維持できるかが、ベータ値 5% 達成上の大きな課題となる。ヘリオトロニ配位での MHD 平衡、安定性の観点からの課題は、シャフラノフシフトがかなり大きくなるので、良い閉じ込め特性、加熱特性を維持しながらベータを上げるには MHD 平衡のダイナミックな制御が必要となることである。また、3.2 節で述べたようにベータが上昇すると周辺領域で交換型モードが不安定になる、周辺の抵抗が大きい領域で理想交換型モードが実験領域にどのような役割を果たすかも、今後の研究課題である。高ベータでの平衡の存在については、磁場の乱れの程度(理論予測)と温度、密度勾配(実験結果)の関係を解明する必要がある。トムソン散乱による電子温度分布計測結果の実コイルを取り込むように改良された HINT コード [37] による系統的な解析の進展が期待される。

W7-AS は 2002 年に運転を終了した。低磁気シア、磁気井戸を持つヘリカル磁気軸の装置としての $\langle\beta\rangle \sim 5\%$ の実証は建設中の W7-X [38] に引き継がれることになる。

W7-X は W7-AS に比べて良好な MHD 特性を持つので、W7-AS の蓄積は十分生かされ、理想交換型不安定性については心配する必要はないだろう。パルセーリングモードが低シア磁気、磁気井戸配位に対して与える影響については、W7-X で解明すべき課題であろう。W7-X では、低磁気シアによるトロイダル電流による磁気面の破壊や閉じ込めの劣化が課題となる可能性は高い。新古典理論に基づく BS 電流は最小化されるような設計がなされているが、理論予測の精度については W7-X の実験を通して実証されるべき課題である。また、有限ベータ効果による磁気面破壊の影響も HINT コード等を使って理論的な検討が進んでおり、理論予測の妥当性の確認が W7-X での研究課題である。

謝辞

本論をまとめるにあたり LHD 実験グループでの議論が有益でした。LHD 実験グループに感謝します。

参考文献

- [1] A. Iiyoshi *et al.*, Nucl. Fusion 39, 1245 (1999).
- [2] K. Nishimura *et al.*, Fusion Technol. 17, 86 (1990).
- [3] H. Renner *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 31, 1579 (1989).
- [4] C. Alejandre *et al.*, Fusion Technol. 17, 131 (1990).
- [5] D.T. Anderson *et al.*, HSX - A Helically Symmetric Toroidal Experiment - (edited by Torsatron/Stellarator Laboratory, Univ. of Wisconsin, Madison, 1993).
- [6] T. Obiki *et al.*, Nucl. Fusion, 41, 833 (2001).
- [7] 岡本正雄他: プラズマ・核融合学会誌 74, 1107 (1998).
- [8] 若谷誠宏他: プラズマ・核融合学会誌 63, 334 (1990).
- [9] K. Uo *et al.*, in Plasma Phy. and Control. Fusion Res. (Proc. 9th Int. Conf. Baltimore, 1982) IAEA, Vinea, Vol.2 (1983) p.209.
- [10] M. Murakami *et al.*, in Plasma Phy. and Control. Fusion Res. (Proc. 13th Int. Conf. Washington DC, 1990) IAEA, Vinea, Vol.2 (1991) p455.
- [11] O. Motojima *et al.*, Nucl. Fusion 25, 1783 (1985).
- [12] S. Okamura *et al.*, Nucl. Fusion 35, 283 (1995).
- [13] O. Motojima *et al.*, in Plasma Phy. and Control. Fusion Res. (Proc. 19th Int. Conf. Lyon, 2002) IAEA, Vinea, OV /1-6.
- [14] A. Weller *et al.*, in Plasma Phy. and Control. Fusion Res. (Proc. 19th Int. Conf. Lyon, 2002) IAEA, Vinea, EX/S 3-1.
- [15] J. Todoroki *et al.*, in Plasma Phy. and Control. Fusion Res. (Proc. 12th Int. Conf. Nice, 1988) IAEA, Vinea, Vol.2

- (1989) p.637.
- [16] A. Anania *et al.*, Phys. Fluids 26, 2210 (1983).
- [17] S.P. Hirshman, Phys. Fluids 26, 3553 (1983).
- [18] T. Hayashi, Theory of Fusion Plasmas, EUR 12149 EN (1989) 11; K. Harafuji *et al.*, J. Comput. Phys. 81, 169 (1989).
- [19] N. Nakajima, Phys. Plasmas 3, 4556 (1996).
- [20] 林 隆也他：プラズマ・核融合学会誌 71, 588 (1995).
- [21] A. Weller *et al.*, in *Proc. of 13th Stellarator Workshop*, 2001, Canberra (<http://wwwr.sphysse.anu.edu.au/admin/stellarator/proceedings.html>).
- [22] R. Brakel *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 39, B273 (1997).
- [23] U. Stroth *et al.*, Nucl. Fusion 36, 1063 (1996).
- [24] H. Yamada *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 43, A 45 (2001).
- [25] K. Narihara *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 72, 1122 (2001).
- [26] A. Komori *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion *to be published*.
- [27] W.A. Cooper *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 34, 1011 (1992).
- [28] C. Schwab, Phys. Fluids B 5, 3195 (1993).
- [29] S. Ohdachi *et al.*, in *Proc. of 13th Stellarator Workshop*, 2001, Canberra (<http://wwwr.sphysse.anu.edu.au/admin/stellarator/proceedings.html>).
- [30] S. Sakakibara *et al.*, Nucl. Fusion 41, 1177 (2001).
- [31] S.P. Hirshman *et al.*, Comput. Phys. Commun. 43, 143 (1986).
- [32] Y. Liang *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 44, 1383 (2002).
- [33] S. Murakami, Nucl. Fusion 36, 359 (1996).
- [34] S. Sudo *et al.*, Nucl. Fusion 30, 11 (1990).
- [35] P. Grigull *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 43, A175 (2001).
- [36] プラズマ・核融合学会誌1998年増刊：特集「大型ヘリカル装置（LHD）計画」第1章．
- [37] 林 隆也他：プラズマ・核融合学会誌 77, 594 (2001).
- [38] G. Grieger *et al.*, Phys. Fluids B 4, 2081 (1992).