

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：82110

研究種目：基礎研究 (C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540529

研究課題名 (和文) 核燃焼プラズマにおけるシンクロトロン放射損失の再評価

研究課題名 (英文) :Re-Evaluation of Synchrotron Radiation in a Reactor-Grade Plasma

研究代表者 佐藤 正泰 (SATO MASAYASU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

研究者番号：80354603

研究成果の概要 (和文)：

相対論的効果、放射の伝搬方向、プラズマ閉じ込め装置の磁場構造・トーラス形状・真空容器内壁での反射を考慮し、炉心級プラズマにおけるシンクロトロン放射損失の評価を行った。高速電子の影響、内壁での反射及びモードスクランブルの効果、放射損失のプラズマパラメータ依存性を評価した。放射損失の磁場依存性はトロイダル磁場の2.5乗を示し、放射損失を低減するには磁場を下げる事が有効であり、これは現在の核融合炉の設計が低磁場化している傾向と整合している。

研究成果の概要 (英文)：

The synchrotron radiation is estimated by calculating the radiation transfer taking into account of the relativistic effect, propagation, real torus shape, magnetic structure, and the wall reflection and mode scrambling at the wall. The effects of supra-thermal electron, the wall reflection and mode scrambling on the synchrotron radiation, and dependence of the synchrotron radiation on plasma parameters are evaluated. Since the synchrotron radiation is proportional to 2.5th power of magnetic field, it is effective for decrement of the radiation loss to reduce the magnetic field. That is consistent to the present trend of DEMO reactor design.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000円	390,000円	1,690,000円
2008年度	700,000円	210,000円	910,000円
2009年度	600,000円	180,000円	780,000円
2010年度	700,000円	210,000円	910,000円
年度	円	円	円
総計	3,300,000円	990,000円	4,290,000円

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：シンクロトロン放射、トーラス形状、電子温度依存性、電子密度依存性、磁場依存性、電子温度、真空容器内壁での反射、モードスクランブル

1. 研究開始当初の背景

(1) トカマク型核融合炉においては、最近、電子温度が高くなる傾向があることからシンクロトロン放射が大きくなる可能性があ

ることが予想された。しかし、従来の評価では、相対論的効果、放射の伝搬方向、プラズマ閉じ込め装置の磁場構造・トーラス形状などが考慮されておらず、核融合炉プラズマの

シンクロトロン放射を高い精度で評価することができていなかった。

(2) トカマクプラズマからの電子サイクロトロン放射 (ECE) に関して、熱的電子の相対論効果を、近似を用いず厳密に取り扱った評価や、磁場に任意の角度で伝搬する放射率の式の導出が研究代表者らにより行われた。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者らによりこれまでに得られた ECE の評価手法を核燃焼トカマクプラズマのシンクロトロン放射の解析に適用することにより、従来は無視されていた過程 (伝搬方向、相対論効果等) の影響を明らかにする。

(2) 相対論的マックスウエル分布におけるシンクロトロン放射損失の定量的評価の精度を上げ、磁場閉じ込め装置における核燃焼プラズマにおけるシンクロトロン放射損失の再評価を行う。

(3) 電子サイクロトロン波 (EC波) 電流駆動により生じる高エネルギー電子からの寄与を含めたシンクロトロン放射損失の評価を行う。

(4) 今後の核融合炉設計にあたって、シンクロトロン放射損失の指針を得る。

3. 研究の方法

シンクロトロン放射損失を評価するには、プラズマ中で電子が放射する ECE がプラズマ中を伝搬する時に、プラズマにより吸収や放射を行う挙動を、放射輸送の式を解き、真空容器内壁まで達する放射を評価し、その後、全真空容器内壁に亘って積分し、全シンクロトロン放射 (P_{syn}) を評価する。この評価の中で、ECE は、偏光方向を持つ二つのモードであること、内壁で反射し再度プラズマ中へ入ること、この反射でモードが変わる (モードスクランプリング) ことを考慮することが必要である。ECE がプラズマ中を磁場に直交して伝搬する場合、ECE の電場の方向が磁場と水平の場合を正常波 (0 モード) と呼び、垂直の場合を異常波 (X モード) と呼ぶ。伝搬方向が磁場と直角でない場合は、正常波、異常波を呼ばないが、ここでは、二つのモードを区別する為に、角度が直角になった場合に正常波に行くモードを正常波、異常波へ行くモードを異常波と便宜上呼ぶ。放射輸送の式を解いて、真空容器内壁に達した ECE の放射輝度を全立体角、真空容器内壁全面積、角周波数に亘って積分し、正常波と異常波の寄与の和が全シンクロトロン放射になる。放射輸送の式を解くにあたって、放射率は磁場に直交する場合のトルブニコフの放射率の公式 (電子の速度分布関数を球対称相対論的マックスウエル分布と仮定) を、任意の伝搬方向に拡張した放射率の式を用いる。又、吸収係数はキルヒホッフの法則に基づき放射率から求める。

4. 研究成果

(1) 相対論的効果、磁場構造、伝搬方向等を取り入れて、炉心級トカマクにおける P_{syn} の評価を行った。水平面上、鉛直面上の任意の視線について評価し、水平面上の放射スペクトルの結果を図 1 に示す。

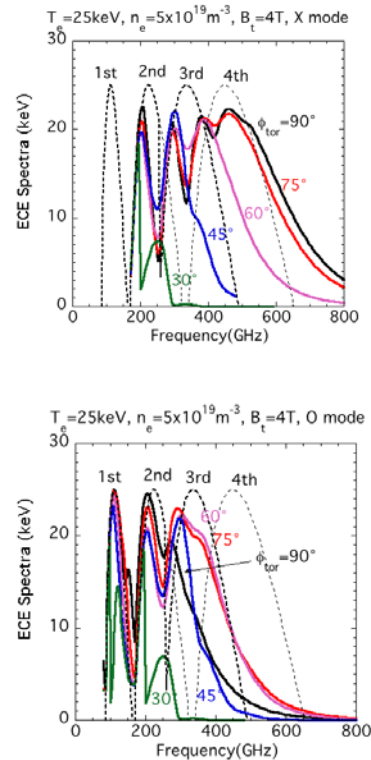


図 1: $B_t=4t$ の ECE スペクトルトロイダル角度依存性 (異常波 (X mode) と正常波 (O mode))。

(2) これらから単位面積当りの P_{syn} (dP_{syn}) を評価し、そのトロイダル角度依存性を図 2 に示す。水平面上の視線ではトロイダル角度依存性を持つことから、異常波、正常波成分に分けて、それぞれの寄与を考察した。異常波成分はトロイダル角度の上昇とともに増加する。これは放射が磁場と直交す

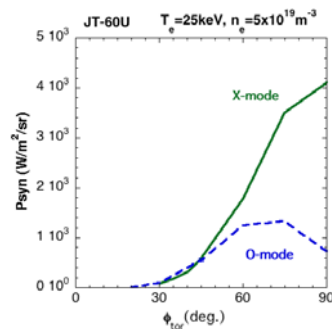


図 2 : dP_{syn} のトロイダル角度依存性。 $B_t=4T$

る視線が大きく、かつこの様な視線が高い温度領域を通過することに因る。正常波成分は、トロイダル角度が60-75度でピークを持つ。これは、正常波の放射が直交成分は低いことと、この様な視線が高い温度領域を通る2つの過程の競合の結果である。 dP_{syn} のポロイダル角度依存性を図3に示す。ポロイダル角度依存性は弱い。この結果を基に、水平面上の視線ではトロイダル角度依存性を持つことから、異常波、正常波成分に分けて、それぞれの寄与を評価し、 dP_{syn} のポロイダル依存性は弱いので、ポロイダル依存性はないとして P_{syn} を評価した。

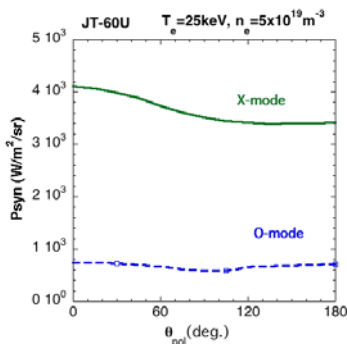


図3: dP_{syn} のポロイダル角度依存性。 $Bt=4T$ 。

(3) 当初想定されていなかった壁での反射の効果とモードスクランブル効果がシンクロトロン放射を評価する上で、重要であることが判り、それを考慮して、放射輸送を取り扱った。 $\sigma(x$ または $o)$ モードにおける有効壁反射係数を R^σ 、 σ モードから σ' モードへの変換の割合を表すモードスクランブル係数を p^σ とすると、壁での反射の効果とモードスクランブル効果を取り入れた放射輸送の式の局所解を用い、反射率(R^x , R^o)、モードスクランブル係数(p^x , p^o)はモードに依存しないと仮定して、この効果の評価した。シンクロトロン放射の反射係数依存性、シンクロトロン放射の正常波の寄与の割合をそれぞれ図4、5にそれぞれ示す。 δ は $R=0$ の場合の $(1-R)$ の依存性からのずれの割合を示す。基本的に $(1-R)$ の依存性に従うが、反射率(R)が増加するにつれて $(1-R)$ の依存性からのずれが大きくなる。高い反射率の領域で、反射の効果は $(1-R)$ の依存性からずれが大きくなり、 $R \sim 0.8$ で2倍になる。また、モードスクランブルの効果に関しては、壁での反射において正常波から異常波へモードが変わる割合(p^x)とその逆過程の割合(p^o)は同一であると仮定し、全シンクロトロン放射損失を評価した。その結果、全シンクロトロン放射損失量はモードスクランブルの度合い(p^x , p^o の値)に依存しないが、全放射量に占める正常波の割合は高くなるということが明らかになった。この結果は次のような

ン放射損失量はモードスクランブルの度合い(p^x , p^o の値)に依存しないが、全放射量に占める正常波の割合は高くなるということが明らかになった。この結果は次のような

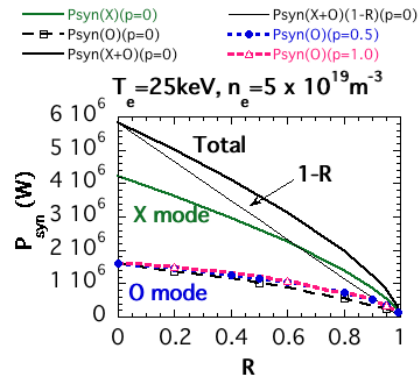


図4: P_{syn} の反射係数依存性。 $Bt=4T$ 。

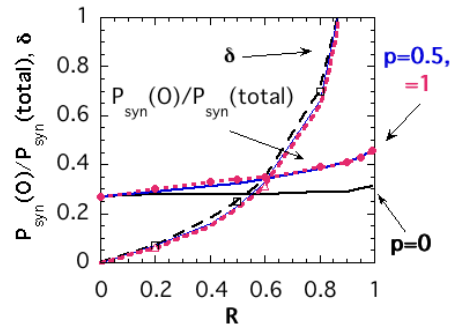


図5: 全シンクロトロン放射損失に正常波の寄与の割合の反射係数依存性。 $Bt=4T$ 。

過程によるものと理解できる。炉心級プラズマにおいては、通常、正常波が光学的に薄い場合でも異常波は光学的に厚い。そのため、光学的に薄い正常波の放射は反射を繰り返すうちにその一部が異常波に変換されてプラズマに吸収され、それが正常波へ変換される。その結果全放射における正常波の割合が増加する。これらの結果から真空容器内壁での反射やモードスクランブルの効果は全シンクロトロン放射の評価に重要な影響を与え、特に反射係数は全シンクロトロン放射の評価に最も影響を与えるパラメーターである事が判った。

(4) 将来の原型炉の電流駆動としてEC波を用いることが有望視され、この場合、電子の速度分布関数はマックスウェル分布からずれる。また、ECEとトムソン散乱の電子温度の測定値が異なることが報告されている。先ず、シンクロトロン放射損失を評価する上で基礎となる放射温度を評価し

た。放射率は磁場に直角方向に放射されるトルブニコフの公式を用い、放射輸送の式を解き、2成分球対称相対論的マクスウェル分布における基本波正常波と2倍高調波異常波のECE放射温度(T_e^{rad})を評価し、高速電子の放射温度へ与える影響を詳細に評価した。定性的には、高速電子の電子温度(T_e^{sup})が低い場合は、基本波正常波に比べ、2倍高調波異常波は影響を受けやすいが、温度が高くなった場合は、影響を受ける度合いは同程度であることがわかった。具体的には、 $T_e^{sup}=50\text{keV}$ の場合は、2倍高調波異常波では高速電子の電子密度(n_e^{sup})が熱的電子の電子密度(n_e^{th})の約0.5%、基本波正常波では n_e^{sup} が n_e^{th} の約5%になると、 T_e^{rad} が熱的電子の電子温度から10%高くなった。一方、 $T_e^{sup}=150\text{keV}$ の場合は、2倍高調波異常波では n_e^{sup} が n_e^{th} の約0.03%、基本波正常波では n_e^{sup} が n_e^{th} の約0.06%で、 T_e^{rad} が T_e^{th} から10%高くなった。この高速電子の放射温度への影響は、2成分温度の放射温度の簡単なモデルを基に熱的電子と高速電子の放射率の周波数依存性を考慮すると、定性的に説明できることが分かった。

- (5) 反射やモードスクランブルの効果の影響を避ける為に、これらの効果は無いと仮定して全シンクロトロン放射損失のプラズマパラメーター依存性を評価した。全シンクロトロン放射の電子温度依存性は電子温度の1.5乗から2乗を示している。電子密度が低い場合は1.5乗に近く、電子密度が高い場合は2乗に近くなる。もしプラズマが黒体であるならば、ステファンボルツマンの公式に従うはずであり、その場合は電子温度の4乗の依存性である。電子密度が高くなるとベキ数が上がるのは、電子密度が高くなると、高い周波数領域でも光学的に厚くなり、黒体放射になる周波数領域が増え、黒体放射の4乗に近づく為に、

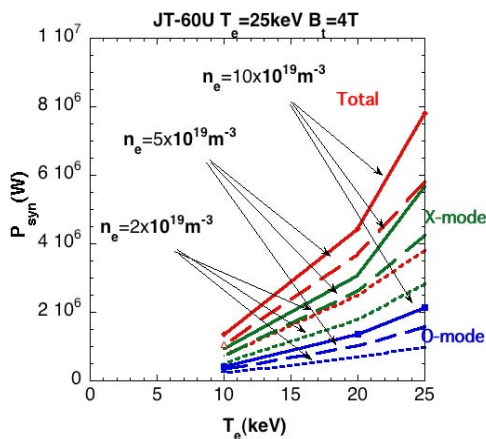


図6: 全シンクロトロン放射の電子温度依存性。
 $n_e(0)=5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, $B_t=4\text{T}$ 。

ベキ数が上がると考えられる。

全シンクロトロン放射の電子密度依存性は電子密度の0.4乗から0.5乗を示し、電子温度が高くなると、ベキ数の値は増えて行く。

全シンクロトロン放射のトロイダル磁場依存性はほぼトロイダル磁場の2.5乗を示している。全シンクロトロン放射損失を低減したい場合、磁場を下げる事が有効であり、これは現在経済性の観点から核融合炉の設計が低磁場へ向かっている事と整合している。

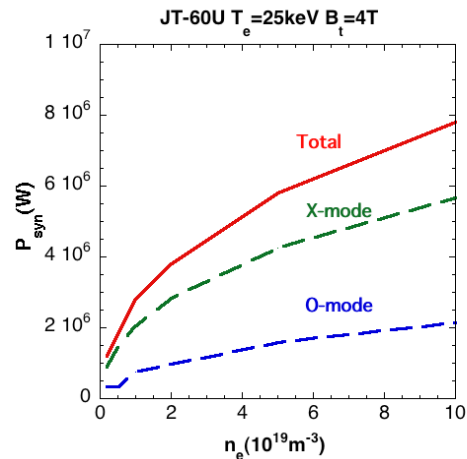


図7: 全シンクロトロン放射の電子密度依存性。
 $T_e(0)=25\text{keV}$, $B_t=4\text{T}$ 。

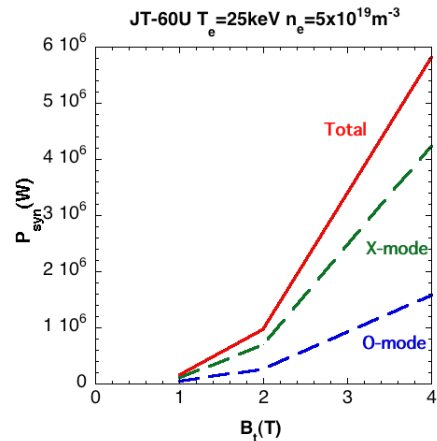


図8: 全シンクロトロン放射の磁場依存性。
 $T_e(0)=25\text{keV}$, $n_e(0)=5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 。

- (6) 核燃焼トカマクプラズマに対して、高エネルギー電子の寄与を含むシンクロトロン放射損失の電子温度・密度の制限値をシンクロトロン放射損失の電子温度依存性を用いて概算した。全シンクロトロン放

射の電子温度依存性は、電子温度の 1.5 乗から 2 乗であり、べき乗の高い値の 2 乗を電子温度依存性として採用する。全シンクロトロン放射が 50% 増加する放射電子温度は、22% 高くなる放射電子温度である。ここでは、高速電子が一様に分布している場合について、高速電子温度が変化せずに、放射電子温度が 22% 高くなる高速電子密度を制限値として評価した。2 成分球対称マックスウエル分布の高速電子の電子温度が 150keV, 100keV, 50keV の場合、放射電子温度が 22% 高くなる高速電子密度は、それぞれ $n_e^{\text{sup}} = 4 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 、 $7 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 、 $5 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ であり、高速電子密度の熱成分に対する割合は 0.08%、0.1%、1% にそれぞれ対応する。次に、高速電子密度が変化せずに、放射電子温度が 22% 高くなる高速電子温度を制限値として評価した。熱成分の 0.1%、0.2% 高速電子が有る場合は、高速電子温度はそれぞれ 120keV、80keV である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① M. Sato and A. Isayama, Evaluation of ECE Spectra in a Tokamak with Torus Geometry and Application to Electron Temperature Measurement, Proc. 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, March 2008, Yosemite, USA, World Scientific Publishing Co. Ptr Ltd. 査読無、(2009) 263-269.
- ② M. Sato and A. Isayama, Radiation Temperature of ECE in Bi-Maxwellian Plasma, Proc. 35th EPS Plasma Physics Conference, Creta, Greece 査読無 (2008) P2. 0092.
- ③ M. Sato and A. Isayama, Feasibility study of ECE measurement in JT-60SA, Nuclear Instruments and Methods in Plasma Research A 623, 査読有、(2010) 635-655.

[学会発表] (計 7 件)

- ① M. Sato and A. Isayama, Evaluation of ECE Spectra in a Tokamak with Torus Geometry and Application to Electron Temperature Measurement, 15th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, March 2008, Yosemite, USA.
- ② M. Sato and A. Isayama, Radiation Temperature of ECE in Bi-Maxwellian Plasma, 35th EPS Plasma Physics

Conference, Creta, Greece 9th-13th June 2008.

- ③ 佐藤正泰、諫山明彦, JT-60SA における ECE スペクトル及び電子温度分布計測検討、日本物理学会第 63 回年次大会、立教大学 2009 年 3 月 27 日~30 日
- ④ M. Sato, and A. Isayama, Feasibility study of ECE measurement in JT-60SA, 1st International Conference on Frontiers in Diagnostic Technologies, Frascati, Italy 25th-27th Nov, 2009.
- ⑤ 佐藤正泰、諫山明彦, 炉心級トカマクプラズマにおけるシンクロトロン放射の評価 (1)-各視線における評価-, 日本物理学会第 64 回年次大会、岡山大学、2010 年 3 月 20 日~23 日
- ⑥ M. Sato and A. Isayama, Evaluation of Synchrotron Radiation in a Reactor-Grade Tokamak Plasma, 52nd Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Chicago, USA 8th-12th Nov. 2010.
- ⑦ 佐藤正泰、諫山明彦, 炉心級トカマクプラズマにおけるシンクロトロン放射の評価 (2)-各視線における評価-, 日本物理学会第 65 回年次大会、新潟大学、2011 年 3 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 正泰 (SATO MASAYASU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号：80354603

(2) 研究分担者

諫山 明彦 (ISAYAMA AKIHIKO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号：90354597

(3) 連携研究者

稲垣 滋 (INAGAKI SHIGERU)

九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号：60300729
(H20->H21: 連携研究者)

長山 好夫 (NAGAYAMA YOSHIO)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・教授
研究者番号：10126138
(H20->H21: 連携研究者)