

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03587

研究課題名(和文) 燃焼プラズマ研究に向けた高エネルギー粒子物理と熱化粒子物理の統合

研究課題名(英文) Integrated study of the physics of high-energy and thermalized particles toward the burning plasma research

研究代表者

西村 伸 (Shin, Nishimura)

核融合科学研究所・研究部・助教

研究者番号：60311205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：加熱や核融合反応による高速イオンを含む状態において熱化粒子側に起こる新古典的諸現象及びMHD平衡の観点からの高速イオン関係理論の見直しを行った。主な成果は、(1) 固有関数法と随伴方程式法に基づく高速イオン速度分布計算のベンチマークテスト、(2) 中性粒子ビーム生成高速イオンの非両極性径方向輸送の理論式導出、(3) 核融合生成高速イオンの磁力線方向自発流の理論式導出、(4) 衝突オペレータテスト粒子項のためのエネルギー依存Coulomb対数の理論式導出、(5) 中性粒子ビーム生成高速イオンの荷電交換損失の計測としての高速イオン荷電交換分光(FIDA)の応用に関する理論式導出と実験、である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これ以前には高速イオン関係の理論検討やシミュレーション技法開発はもっぱら高速イオン自体の研究として行われており、一方熱化粒子の輸送理論や平衡理論は加熱や核融合反応で生じる高エネルギー粒子の存在を考慮せずに検討される事が多かった。本研究では熱化粒子の立場から見た高エネルギー粒子という観点で各種計算手法検討を行なっている点がユニークである。また検討された諸課題は特に今後の準対称配位実験(具体的には日中共同事業として準備が進められているCFQS)で重要になると考えられる物が多く、それに向けて実験技術上の課題も検討している。

研究成果の概要(英文)：For the thermalized particle physics in situations including fast ions due to the heating and/or the nuclear reactions, theoretical studies on the fast ions are conducted. Main themes was (1) a benchmark test of the eigenfunction method and the adjoint equation method for neutral-beam(NB)-produced fast ions, (2) a theory of non-ambipolar radial transport of NB-produced fast ions, (3) a theory of spontaneous parallel flows of fusion-born fast ions, (4) a theory of energy-dependent Coulomb logarithm for the test particle portion in the linearized Coulomb collision operator, and (5) theoretical and experimental studies on an application of FIDA as a measurement of the charge exchange loss of NB-produced fast ions.

研究分野：磁場閉じ込め核融合プラズマ理工学

キーワード：新古典理論 高エネルギー粒子 ドリフト運動論的方程式 Coulomb衝突

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

加熱や核融合反応で生じる高エネルギー粒子に関する研究は多数あったが、もっぱら高エネルギー粒子それ自体に関わる物であり、一方新古典理論などの熱化粒子の輸送理論はこれら高エネルギー粒子の存在を考慮せずに検討されていた。代表者は論文①～③などで、高エネルギー粒子存在下で熱化粒子に起こる新古典的諸現象の検討や、そのために用いる高エネルギー粒子速度分布計算方法の考案を始めており、実機実験との比較も行なっている所であった。

2. 研究の目的

論文①～③の検討は主に中性粒子ビーム入射(NBI)で発生する高速イオンを考えていたが、本研究では核融合生成高速イオンも視野に入れる。論文①と同様に熱化粒子の立場から見た高速イオンの取り扱いのために計算コストを削減した計算手法を考案していくとともに、他の計算手法とのベンチマークテストも行う。

3. 研究の方法

各種理論式の考案は代表者西村が行うが、ベンチマークテストは研究協力者山口の協力を得て行う。これら①～③の頃の研究は京都大学との双方向共同研究の一環でもあって、その体制も引き続き活用する事とした。理論検討、数値計算については、論文③の経緯から必要に応じ研究協力者西岡とも情報交換しながら行う。

4. 研究成果

(1) 固有関数法と随伴方程式法に基づく4次元簡略化高速イオン速度分布計算のベンチマークテスト

NBIで生成される高速イオンの速度分布 $f_t(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ の計算手段として5次元位相空間(小半径 s , ポロイダル角 θ , トロイダル角 ζ , 速度 v , ピッチ角変数 ξ)を扱う数値シミュレーション技法がしばしば用いられる。しかし、熱化ターゲット粒子種に起こる高速イオン駆動の新古典的諸現象(磁力線方向フローや径方向輸送)の計算や非等方圧力状態のMHD平衡・安定性の検討、そして加熱パワー計算などといった熱化粒子種の立場の問題にとっては、そのような詳細な五次元位相空間構造は必須ではなく、Legendre展開の低次成分のみが必要でしかもその磁気面平均が判ればよい場合が多い。このような目的のために固有関数法と随伴方程式法に基づく4次元簡略化計算方法を論文①,④に示しておいた。両者まとめて要約すれば接線入射NBIにおける非捕捉周回粒子を主に想定して(捕捉ピッチ角領域を全く考慮しないわけではないにしても)、磁力線垂直方向案内中心運動を無視するものである。このような計算と5次元数値シミュレーションコードGNET(論文⑤)のベンチマークテストを行い、妥当性を確認した。

(2) NBIで形成された高速イオンの非両極性径方向輸送の理論

先に論文③において、接線入射NBIで熱化粒子に高速イオン駆動のフローが発生する時に

そこには高速イオン駆動の非両極性径方向輸送も伴う事を指摘しておいた。ヘリオトロン/ステラレータなどの従来型非軸対称系装置では、この機構での輸送はそれ以外の要因による物に比べて全くのマイナー修正でしか無いが、非両極性輸送を桁違いに低減した今後の準対称装置(例えば論文⑥)の NBI では無視できない物となる。これを含めた両極性条件の検討では高速イオンの非両極性輸送も含める必要が有る。これは論文①で説明しておいたように高速イオン新古典粘性力 $\langle \mathbf{B} \cdot \nabla \cdot \boldsymbol{\pi}_f \rangle = -\langle (p_{\parallel f} - p_{\perp f}) \mathbf{B} \cdot \nabla \ln B \rangle$ を形成する圧力非等方性の磁気面上非一様性が径方向輸送フ

ラックス $\langle \boldsymbol{\Gamma}_f^{\text{bn}} \cdot \nabla s \rangle = -(c/e_f) \langle (p_{\parallel f} - p_{\perp f}) (\nabla s \times \mathbf{B} / B^2 + \tilde{U} \mathbf{b}) \cdot \nabla \ln B \rangle$ も形成する物である。今回は論文

①では示せなかったその具体的計算方法を固有関数法①, 随伴方程式法④, Fourier 展開法⑦の組み合わせにより示した。

(3) 核融合生成高速イオンの磁力線方向自発流の理論

前項(2)の理論を、核融合生成高速イオン速度分布の径方向勾配に基づく磁力線方向自発流(論文⑧,⑨)の計算にも応用できる。先行理論は軸対称トカマクに関する物であったが、今回は先にも述べた今後の準対称配位(例えば論文⑥)にも適用可能なように理論拡張した。これは今後の燃焼炉心設計における MHD 平衡計算に有益である。

(4) 衝突オペレータにおけるテスト粒子項のためのエネルギー依存 Coulomb 対数の理論

多くのプラズマ関係理論において Coulomb 対数は粒子速度に無関係な定数として扱われるが、本来は相対衝突速度 $|\mathbf{v} - \mathbf{v}'|$ の関数である。熱化粒子どうしの衝突であればこれを熱速度程度の定数に置換えればよいが、高速イオンと熱化粒子の場合はこの最適定数は自明ではなく研究者によりまちまちである。この検討のために、本来の $v_{\text{rel}} \equiv |\mathbf{v} - \mathbf{v}'|$ の関数である Coulomb 対数(文献⑩)を持った Landau 型衝突項表現から出発し、論文②の Rosenbluth ポテンシャル公式を応用して線形化衝突項 $C_{ab}(f_a, f_{bM})$ の球座標表現を導いた。

(5) 小型中型装置における NBI 生成高速イオンの荷電交換損失の計測としての高速イオン荷電交換分光(FIDA)の応用に関する実験と計算コード整備

過去の論文でも前項(1)~(3)の検討でも高速イオン荷電交換損失は考慮していなかったが、論文⑤のような小型中型装置ではこれが無視できない事が京都大学 Heliotron-J 装置に関する双方向共同研究で判っている。各種の高速イオンシミュレーション技法の中には荷電交換損失を取入れられる物もあるが、そのような計算への入力たる中性粒子密度の三次元実空間分布を計測する事はほとんど不可能である。この状況で上記諸課題の検討を如何に進めるかを考えた結果、FIDA ⑪を荷電交換損失の計測手段として用いて、実測速度分布減衰率を論文①,③,④のようなビーム駆動効果の計算や非等方圧力 MHD 平衡における諸現象の検討に取入れるという考えに至った。

論文①,④で論じている成分、すなわちピッチ角変数 $\xi \equiv v_{\parallel} / v$ の奇関数たる $[\bar{f}_f(\xi) - \bar{f}_f(-\xi)] / 2$,

Legendre展開二次の磁気面平均 $\langle \int_{-1}^1 P_2(\xi) \bar{f}_f(\xi) d\xi / B \rangle$, そして Legendre展開零次の磁気面平均

$\langle \int_{-1}^1 \bar{f}_f(\xi) d\xi \rangle$ といった減速速度分布関数のマクロスコピックな構造については、荷電交換損失が

ある場合と無い場合の間に

$$\bar{f}_f(s, \theta, \zeta, v, \xi) = \frac{\mathcal{W}(v)}{\mathcal{W}(v_b)} \bar{f}_f^{\text{w/o CX loss}}(s, \theta, \zeta, v, \xi), \quad (1)$$

$$\ln \mathcal{W}(v) \equiv \int \frac{v^2}{v^2 v_{Te} (3\sqrt{\pi}/2) G(x_e) + v_e^3 \tau_{cx}(v)} \tau_s dv$$

という関係がある。つまり荷電交換損失の影響は速度分布のピッチ角空間構造は変えずにエネルギー空間構造に中性粒子密度で決まる減衰率を掛けるという形で現れる。ここで、コア領域にて電離と再結合を繰り返しながら僅かに残っている中性粒子の量は基本的には電子温度と電子密度の関数として決まるとの考えから、荷電交換損失を表す時定数 $\tau_{cx}(v)$ を磁気面量としている。ピッチ角変数 ξ の偶関数成分については、加熱パワー計算や非等方圧力MHD平衡状態の検討などを目的としてピッチ角積分且つ磁気面平均の量を考えた時に式(1)の関係が言えるのであって、高速イオン自身の平行粘性力や径方向輸送を決めている速度分布成分など(いわば五次元位相空間中の微細構造)についてはこのような関係は成り立たない。しかし、FIDAは観測視線に垂直な方向に関しては速度空間積分し、視線方向に関しては計測ビーム幅程度の実空間積分をした速度分布を観測する事になるので、このような微細構造は重要ではない。図1に示す計算コード群の結果と実験での実測Balmer α スペクトルの比較から、エネルギー空間減衰率 $\mathcal{W}(v)/\mathcal{W}(v_b)$ については実質的中性粒子密度(高速イオン平行粘性力や径方向輸送の計算に必要)を知る事になる。今回 Heliotron-J 双方向共同研究でこれを行うために、これらコード群を同装置配位で使えるように核融合研プラズマシミュレータに整備する事も行った。

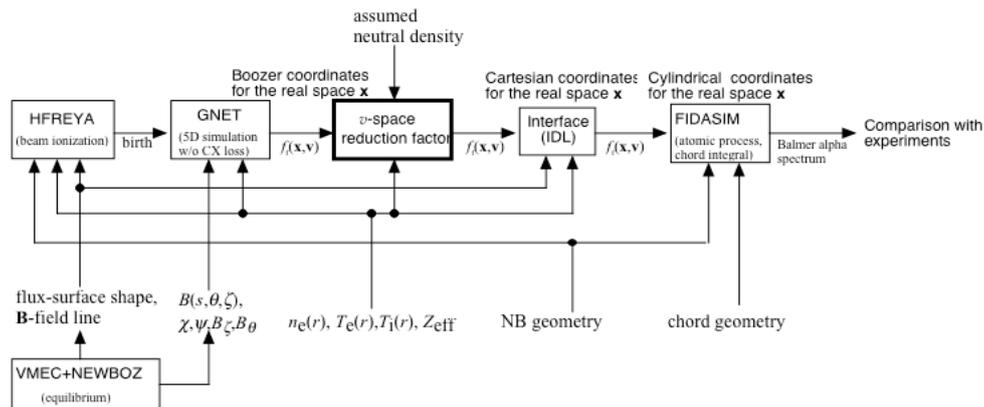


図1 高速イオン荷電交換損失の計測としての FIDASIM コード(論文⑩)の応用

<引用文献>

- ① S.Nishimura, Y.Nakamura, and K.Nishioka, Phys.Plasmas **22**, 092505 (2015)
- ② S.Nishimura, Phys.Plasmas **22**, 122503 (2015), **23**, 029901 (2016)
- ③ K.Nishioka, Y.Nakamura, S.Nishimura, *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 032511 (2016)
- ④ S.Nishimura Phys.Plasmas **25**, 042509 (2018)
- ⑤ H.Yamaguchi and S.Murakami, Nucl.Fusion **56**, 026003 (2016)
- ⑥ A.Shimizu, S.Kinoshita,M.Isobe, *et al.*, Nucl.Fusion **62**, 016010 (2020)
- ⑦ S.Nishimura, H.Sugama, and Y.Nakamura, Fusion Sci. Technol. **51**, 61 (2007)
- ⑧ C.T.Hsu, P.J.Catto, and D.J.Sigmar, Phys. Fluids B **2**, 280 (1990)
- ⑨ C.T.Hsu, K.C.Shaing, R.P.Gormley, and D.J.Sigmar, Phys. Fluids B**4**, 4023 (1992)
- ⑩ T.Kihara and O.Aono in *Kinetic Equations* edited by R.L.Liboff and N.Rostoker (Gordon and Breach, New York, 1971)
- ⑪ W.W.Heidbrink, D.Liu, Y.Yao, E.Ruskov, and B.Geiger, Commun.Comput.Phys.**10**, 716 (2011)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shin Nishimura	4. 巻 25
2. 論文標題 On the anisotropic velocity distribution of fast ions in NBI-heated toroidal plasmas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 042509-1 ~31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5025212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S.Nishimura and H.Yamaguchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Neoclassical parallel viscosity effects of fast ions in NBI-heated and/or burning plasmas in quasi-symmetric stellarators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of EPS 47th Conference on Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S.Nishimura, H.Yamaguchi, S.Kobayashi, S.Kado, T.Minami, S.Ohshima, H.Okada, Y.Nakamura, and K.Nagasaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Application of FIDA as a charge exchange loss measurement for NB-produced fast ions in small or medium-size devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of EPS 48th Conference on Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 西村伸, 奴賀秀男	4. 巻 100(7)
2. 論文標題 高エネルギー粒子を含む問題におけるCoulomb衝突項	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 プラズマ核融合学会誌（小特集「古くて新しい新古典輸送理論の新展開」第3.2章）	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 S.Nishimura, H.Yamaguchi, S.Kobayashi, S.Kado, T.Minami, S.Ohshima, H.Okada, Y.Nakamura, and K.Nagasaki
2. 発表標題 Application of FIDA as a charge exchange loss measurement for NB-produced fast ions in small or medium-size devices
3. 学会等名 65th Annual Meeting of the APS-DPP (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村伸, 佐竹真介, 山口裕之, 洲鎌英雄
2. 発表標題 準対称配位新古典輸送計算のためのExBオペレータ
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第40回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村伸, 山口裕之, 小林進二, 門信一郎, 南貴司, 大島慎介, 岡田浩之, 中村祐司, 長崎百伸
2. 発表標題 高速イオン荷電交換損失の計測としてのFIDAの応用
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第39回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Nishimura, H.Yamaguchi, S.Kobayashi, S.Kado, T.Minami, S.Ohshima, H.Okada, Y.Nakamura, and K.Nagasaki
2. 発表標題 Application of FIDA as a charge exchange loss measurement for NB-produced fast ions in small or medium-size devices
3. 学会等名 48th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Nishimura and H.Yamaguchi
2. 発表標題 Neoclassical parallel viscosity effects of fast ions in NBI-heated and/or burning plasmas in quasi-symmetric stellarators
3. 学会等名 47th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村伸, 山口裕之
2. 発表標題 準軸対称ステラレータにおける 高速イオンの二つの新古典粘性効果
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shin Nishimura and Hiroyuki Yamaguchi
2. 発表標題 A Benchmark Test of the Eigenfunction Method and the 5D Simulation on the Fast Ion Slowing Down Velocity Distribution in the NBI-heated Helical Plasmas
3. 学会等名 22nd International Stellarator/Heliotron Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin Nishimura and Hiroyuki Yamaguchi
2. 発表標題 A benchmark test of the eigenfunction method and the 5D simulation on the fast ion slowing down velocity distribution in the NBI-heated helical plasmas
3. 学会等名 60th annual meeting of APS-DPP (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山口 裕之 (Yamaguchi Hiroyuki) (90797101)	核融合科学研究所・研究部・准教授 (63902)	
研究協力者	岡田 浩之 (Okada Hiroyuki) (50169116)	京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授 (14301)	現在はエネルギー理工学研究所研究協力員
研究協力者	西岡 賢二 (Nishioka Kenji) (40786117)	名古屋大学・理学部・特任助教 (13901)	現在は(株)日本アムスコ社員

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------