

QUESTにおける長時間放電でのホール素子を用いたプラズマ電流と位置のリアルタイム同定

長谷川, 真
九州大学応用力学研究所

中村, 一男
九州大学応用力学研究所

関子, 秀樹
九州大学応用力学研究所

花田, 和明
九州大学応用力学研究所

他

<https://doi.org/10.15017/1660011>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 149, pp.10-15, 2015-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

QUEST における長時間放電でのホール素子を用いた プラズマ電流と位置のリアルタイム同定

長谷川 真*¹ 中村 一男*¹ 関子 秀樹*¹ 花田 和明*¹ 藤澤 彰英*¹ 出射 浩*¹ 徳永 和俊*¹
永島 芳彦*¹ 東島 亜紀*¹ 川崎 昌二*¹ 中島 寿年*¹ Kuzmin Arseniya Aleksandrovich*¹
恩地 拓己*¹ 渡邊 理*¹ Mishra Kishore Kanti*²

(2015 年 8 月 28 日受理)

Real-time identification of plasma current and its position with hall sensors for long-pulse operation on QUEST

Makoto HASEGAWA, Kazuo NAKAMURA, Hideki ZUSHI, Kazuaki HANADA, Akihide FUJISAWA,
Hiroshi IDEI, Kazutoshi TOKUNAGA, Yoshihiko NAGASHIMA, Aki HIGASHIJIMA,
Shouji KAWASAKI, Hisatoshi NAKASHIMA, Kuzmin Arseniya Aleksandrovich,
Takumi ONCHI, Osamu WATANABE and Mishra Kishore Kanti
E-mail of corresponding author: hasegawa@triam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

Procedure to identify the plasma current and its position with hall sensors in real time is presented for long-pulse operation. Hall sensors are installed around the vacuum vessel of QUEST on the atmospheric side. With this procedure, plasma current is treated as a filament current positioned in the vacuum vessel. The plasma current and its position are calculated by the intensities of hall sensor signals and its ratios, respectively. The validity and noise immunity of this procedure is checked numerically. With hall sensor signals, the plasma current and its position are calculated experimentally in real time, and the calculation results correspond well to the results with a rogowski coil and flux loops. Drift errors do not occur with hall sensors, and this procedure is suitable for long-pulse operation.

Keywords: *hall sensor, real time, plasma position, plasma current, long pulse*

1. 緒言

トカマク型実験炉において、プラズマ電流とプラズマの位置を制御するには、それらをリアルタイムで同定することが大変重要であり、通常、それらの同定にはロゴスキーコイルやフラックスループ、ピックアップコイルなどの磁気センサーが用いられる。しかしながら、これらのセンサーでは時間積分操作が必要で、この操作を行う過程でドリフトノイズと呼ばれるエラーが時間と共に累積するため、長時間の放電には適していない。このドリフトノイズの低減のために時間積分器を長時間放電用に改良する幾つかの試み¹⁻³⁾がなされている。一方で、磁場強度に比例した電圧を出力するホール素子は、時間積分

を必要となく、本質的にドリフトノイズは生じない。

QUEST (Q-shu university experiment with the steady-state spherical tokamak)⁴⁻⁶⁾計画の重要な課題の一つとして、長時間プラズマ放電の実現が挙げられる。QUEST 装置では現在までに、長時間放電のためのプラズマ電流とその位置の同定に対して、幾つかの手法が試されてきた⁷⁻⁹⁾。しかしながら、これらの方法はいずれも時間積分をおこなうものであり、長時間放電において本質的な解決を提供するものではなかった。そこで、ここではホール素子を用いてプラズマ電流とその位置を同定する新しい手法を提案する。この手法では、プラズマ電流を 1 本のフィラメント電流として取り扱う。第 2 章では、ホールセンサーの仕様及び QUEST 装置での設置位置、またホール素子の較正手法について述べる。第 3 章ではプラズマ電流とその位置を同定する具体的手法につ

*1 九州大学応用力学研究所

*2 九州大学大学院総合理工学府

いて述べる。第 4 章では、その手法の妥当性と耐ノイズ性について述べて、第 5 章では、その手法での計算結果の提示を行い、第 6 章でまとめとする。

2. ホール素子の仕様と較正

QUEST 装置に設置するホール素子として、Allegro Micro Systems LLC¹⁰製の A1389 および A1302 を選定した。このセンサーは 2 mm × 3 mm × 1 mm のサイズで、3 ピンを有する表面実装の IC である (Fig. 1)。5V の電源電圧を IC に印加すると、磁場強度がゼロのときに、その半分の約 2.5V を信号として出力し、そこを起点として磁場強度に比例した電圧信号を出力する。A1389 のデータシートによると磁場の感度は 9 mV/G であるので、磁場の検出範囲はおおよそ ±220 G になる。動作温度範囲および温度係数はそれぞれ -40°C ~ 150°C と 0.12 %/°C である。ホール素子は或る方向の磁場強度を計測するものであるが、どの方向の磁場であっても計測できるように、このセンサーを 3 つ、互いに直行する向きに配置して 3 軸ホール素子を構成した。ただし、特にトロイダル磁場 (TF) 方向の磁場は、他の水平方向や垂直方向の磁場と比べて磁場強度が強いので、3 つのセンサーのうち一つに A1302 を用いることとした。このセンサーの磁場の検出範囲は ±1600 G であり、A1389 よりも広い。3 軸ホール素子のパッケージサイズは 20 mm × 20 mm × 30 mm である。これらセンサーの設置位置を Fig. 2 に示す。これら 3 軸ホール素子は真空容器の外側に、かつ大気側に設置され、設置高さはそれぞれ $z = 0, \pm 400, \pm 800$ mm である。 z 方向の磁場を計測する z 軸ホール素子も真空容器の中心軸上に、それぞれ $z = 0, \pm 400, \pm 800$ mm に設置した。この z 軸ホール素子のパッケージサイズは 15 mm × 15 mm × 20 mm であり、プラズマ電流による磁場は外側よりも中心軸上の方が強いので、センサーとして A1302 を採用している。

各々のホール素子は、大半径位置 R_{Hi} と垂直位置 z_{Hi} 、ホール素子の計測磁場の方向を表す単位ベクトル \mathbf{u}_i 、またその感度 s_i というパラメータを有している。ここで添え字 i は、ホール素子の番号を表し、感度 s_i の次元は V/G である。ホールセンサー位置 R_{Hi} 、 z_{Hi} や感度 s_i を固定して、ポロイダル磁場 (poloidal field, PF) コイルやトロイダル磁場 (toroidal field, TF) コイルをそれぞれ単体で通電したときに得られるホール素子の信号強度から、計測磁場方向を表す単位ベクトル \mathbf{u}_i の較正を行っている。すなわち、 l 番目のコイルによるコイル電流 I_l により i 番目のホール素子で計測される磁場 B_{Cil} はビオ・サバルの式

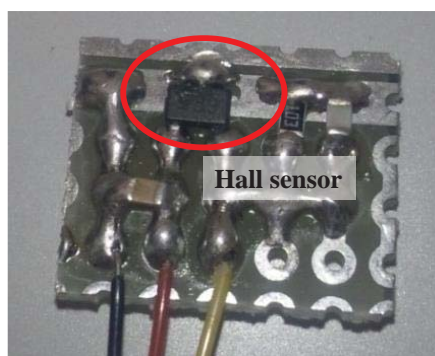


Fig. 1 Hall sensor on a circuit board.

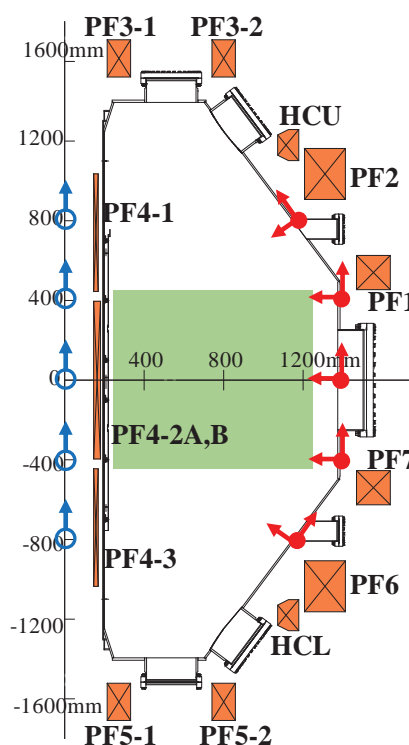


Fig. 2 PF coils on QUEST and installed positions of hall sensors (closed circle: triaxial hall sensor, open circle: z-axis hall sensor). Data sets are calculated preliminary with filament position of hatched area.

から計算されるが、このとき単位ベクトル \mathbf{u}_i は、最小二乗法を用いて次の式を最小にする \mathbf{u}_i として較正される。

$$\varepsilon_i = \sum_l (v_{oil} - s_i(\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{B}_{Cil}))^2 \quad (1)$$

ここで、 v_{oil} は l 番目のコイルによるコイル電流 I_l により i 番目のホール素子で計測される信号電圧である。

3. リアルタイムでの同定手法

プラズマ電流とその位置をリアルタイムに同定

するために、事前に磁場のデータセット b_{Cijk} を計算する必要がある。この b_{Cijk} は次の式で定義される。

$$b_{Cijk} = b_{Cijk} \cdot \mathbf{u}_i \quad (2)$$

ここで \mathbf{u}_i は、 i 番目のホール素子の磁場の計測方向の単位ベクトルで、 b_{Cijk} は水平方向 j 番目と垂直方向 k 番目のグリッド位置にプラズマ電流を模擬した単位フィラメント電流が置かれた際に i 番目のホール素子の位置で計算される磁場ベクトルである。従って、 b_{Cijk} はグリッドポイント (R_j, z_k) に置かれた単位プラズマ電流によって i 番目のホール素子で計測される磁場強度を表す。下側添え字の C は、計算された値 (Calculated values) という意味である。この計算においては、グリッドエリアとして水平方向に $R_{min} = 0.25$ m から $R_{max} = 1.25$ m まで、垂直方向に $z_{min} = -0.45$ m から $z_{max} = 0.45$ m までとしており、そのピッチ間隔として、それぞれの方向で $\Delta = 0.05$ m としている。従って j 番目の水平位置、 k 番目の垂直位置はそれぞれ $R_j = R_{min} + j\Delta$ と、 $z_k = z_{min} + k\Delta$ で表される。また、磁場の比である r_{Cijk} も事前に計算される。ここで、 r_{Cijk} は次の式で定義される。

$$r_{Cijk} = b_{Cijk} / \sum_i b_{Cijk} \quad (3)$$

実際の計算では、最初にホール素子の生信号 v_{Ri} から時刻ゼロでのオフセット値が差し引かれる。

$$v_{oi}(t) = v_{Ri}(t) - v_{Ri}(0) \quad (4)$$

ここで v_{oi} はオフセット値を差し引いた値で、プラズマ電流が正である時に信号出力が正となるように v_{oi} の符号もまた調整される。次に、 i 番目のホール素子でプラズマ電流に起因する磁場 B_{Mi} は、PF コイルや TF コイルによる磁場を差し引くことで抽出することができる。

$$B_{Mi} = (v_{oi} - \sum_l c_{il} I_l) / s_i \quad (5)$$

ここで I_l は l 番目のコイルによる電流で、 c_{il} は V/kA の次元を持ち、単位コイル電流によって i 番目のホール素子で計測される電圧であり、実験的に決定される。下側添え字の M は計測された値 (Measured values) という意味である。また、計測された磁場の比は次の式で定義される。

$$r_{Mi} = B_{Mi} / \sum_i B_{Mi} \quad (6)$$

プラズマ電流を模擬したフィラメント位置の同定を行うために、最初に次の式を最小にする水平方

向のインデックス j 、および垂直方向のインデックス k を求める。

$$\varepsilon = \sum_i (r_{Mi} - r_{Cijk})^2 / \sigma_i^2 \quad (7)$$

ここで ε は最小二乗法によるエラー値である。 σ_i は計測の標準偏差であり、ここでは簡単のために 1 としている。エラー値を最小にするためのグリッド点 (R_j, z_k) は、あるグリッド点に注目した時に、その周囲のグリッド点のエラー値を評価することで行われる。すなわち、いずれかの周囲のグリッド点の方が中心のグリッド点より小さい場合には、そのグリッド点を中心にして再度、周囲のグリッド点を評価するというようにして再帰的に、エラー値が最小となるグリッド点が探索される。

グリッド点を探索したことで、大まかにフィラメント位置を決定したことになるが、実際にはフィラメント位置は離散的でなく連続的な値である。このため、 r_{Cijk} をこのグリッド点を中心にした R と z の関数とする線形近似関数を求める。この時、 r_{Cijk} の線形近似は次の式で与えられる。

$$r_{ci}(R, z) = (r_{Ci,j+1,k} - r_{Cijk})(R - R_j) / \Delta + (r_{Cij,k+1} - r_{Cijk})(z - z_k) / \Delta + r_{Cijk} \quad (8)$$

すなわち、 r_{ci} は $r_{ci} = f_{ci} R + g_{ci} z + h_{ci}$ というように f_{ci} 、 g_{ci} 、 h_{ci} を係数とする R と z の線形関数で表され、各係数は $f_{ci} = (r_{Ci,j+1,k} - r_{Cijk}) / \Delta$ 、 $g_{ci} = (r_{Cij,k+1} - r_{Cijk}) / \Delta$ 、 $h_{ci} = r_{Cijk} - f_{ci} R_j - g_{ci} z_k$ で与えられる。 r_{ci} による最小二乗法のエラー値は次の式になる。

$$\varepsilon = \sum_i (r_{Mi} - r_{ci})^2 / \sigma_i^2 = \sum_i (r_{Mi} - (f_{ci} R + g_{ci} z + h_{ci}))^2 / \sigma_i^2 \quad (9)$$

エラー値を最小にするフィラメント位置 (R, z) は、 $\partial \varepsilon / \partial R = \partial \varepsilon / \partial z = 0$ を連立させて解くことで求められる。この時、連立の式は次の形で与えられる。

$$\begin{pmatrix} \sum_i f_{ci}^2 & \sum_i f_{ci} g_{ci} \\ \sum_i f_{ci} g_{ci} & \sum_i g_{ci}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i f_{ci} (r_{Mi} - h_{ci}) \\ \sum_i g_{ci} (r_{Mi} - h_{ci}) \end{pmatrix} \quad (10)$$

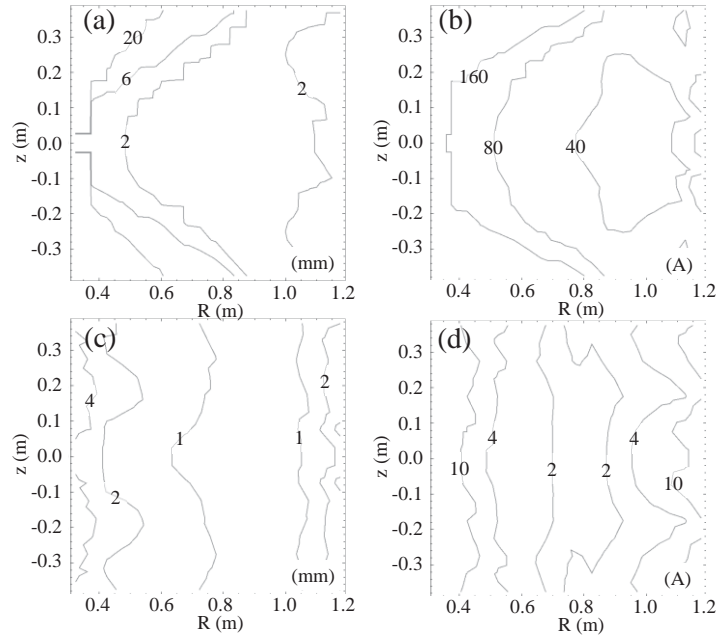


Fig. 3 Difference between assumed and identified values (a) on filament position with 5 sensors, (b) on filament current with 5 sensors, (c) on filament position with 10 sensors, and (d) on filament current with 10 sensors.

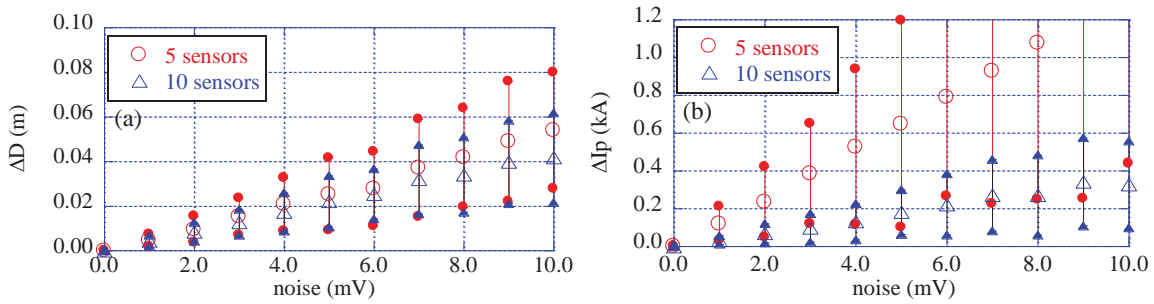


Fig. 4 Noise immunity with the case of the plasma current 10 kA positioned on $R = 0.8$ m and $z = 0.0$ m. Difference with random noise on (a) plasma position and (b) plasma current with 5 and 10 sensors.

σ_i は簡単のために1とした。式(10)を解くことでフィラメント位置を連続的な値として求めることができる。プラズマ電流は最小二乗法として次の式を最小にするものとして与えられる。

$$\varepsilon = \sum_i (B_{Mi} - I_p b_{Ci})^2 / \sigma_i^2 \quad (11)$$

ここで b_{Ci} はフィラメント位置(R, z)における b_{Cijk} の線形近似値である。 σ_i は簡単のために1とする。式 $\partial\varepsilon/\partial I_p = 0$ を解くことでプラズマ電流は次の式で与えられる。

$$I_p = \left(\sum_i B_{Mi} b_{Ci} \right) / \left(\sum_i b_{Ci}^2 \right) \quad (12)$$

4. 計算精度と耐ノイズ性

このプラズマ位置と電流を同定する手法について、

フィラメント位置と電流をある値に仮定し、本手法によって再度、フィラメント位置と電流を計算した結果とを比較することで、計算精度の検証を行う。すなわち、フィラメント電流によって誘起される磁場はビオ・サバルの式より計算することができ、ホール素子で出力されるべき電圧信号も計算できる。この値を用いて、提案した手法でフィラメント位置と電流を求める。この時、当初仮定したフィラメント位置と電流の値と、本手法によって求めた値との差が、本手法による計算誤差になる。プラズマ電流を10kAとして、フィラメント位置を水平方向で $0.3 \text{ m} < R < 1.2 \text{ m}$ 、垂直方向で $-0.4 \text{ m} < z < 0.4 \text{ m}$ の範囲に置いた時の計算誤差をFig. 3に示す。計算誤差は使用するホール素子の個数を違えた二つのケースで検証することにした。最初のケース(Fig. 3(a), (b))は、大半径外側に設置されているポロイダル方向の磁場を計測する5つのホール素子を使用

した場合で、もう一つのケース (Fig. 3(c), (d)) は、この 5 つのホール素子に加えて、真空容器中心軸に設置されている 5 つのホール素子を合わせた計 10 個のホール素子を使用した場合である。10 個のホール素子を使用した場合、仮定したフィラメント位置と計算によって求めた位置の差は、ほぼ全ての領域において 2 mm 以下である (Fig. 3(c)) のに対して、5 個の場合では半径の小さい領域において 2 mm 以上の誤差が発生している (Fig. 3(a)) ことがわかる。プラズマ電流の計算誤差は、10 個の場合において、ほとんどの領域において 10 A よりも低い (Fig. 3(d)) が、5 個の場合では 40 A よりも大きい (Fig. 3(b))。

次に、この同定手法の耐ノイズ性についても調査する。ここでは計算によって求めたホール素子の電圧信号に数値的にランダムノイズを付加した時のプラズマ位置と電流を計算して、その計算誤差を評価する。10 kA のプラズマ電流が $R = 0.8$ m、 $z = 0.0$ m にあった場合の、ホール素子の信号電圧の平均は、5 個のホール素子を使った場合は 50.3 mV であり、10 個の場合には 57.2 mV である。ノイズを考慮した電圧信号は次の式で与えられる。

$$v_{SIGi} = v_{CALi} + r_i v_{RND} \quad (13)$$

ここで、 v_{SIGi} はプラズマ位置と電流を計算するための i 番目のホール素子の信号であり、 v_{CALi} はビオ・サバールの式とホール素子の感度から計算した信号電圧である。 v_{RND} はランダムノイズの強度をあらわし、 r_i は $-1 < r_i < 1$ の範囲にある乱数である。ノイズを考慮した場合の計算誤差を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a), (b) の横軸はノイズ強度 v_{RND} である。平均的な計算誤差とその標準偏差は各々の強度において 100 回の計算を行うことで求めている。Fig. 4(a) によれば、センサーを 10 個使用した場合と比べて、5 個使用した場合は位置の計算誤差は数ミリ大きくなっていることがわかる。また、Fig. 4(b) によると、センサーを 10 個使用した場合は、ノイズの強度が約 10 mV であってもプラズマ電流の平均的な計算誤差は 0.4 kA より少ないのに対して、5 個使用した場合は、1 kA 以上という大きな計算誤差になっている。この理由として、Fig. 3 に示したように、もともと 5 個の場合には計算の精度が低いことに加え、計算手順としてプラズマ電流の値はプラズマ位置を同定した後に算出されるからと考えられる。すなわち、位置の計算誤差がプラズマ電流の計算誤差に積み重なるために、プラズマ電流の計算誤差が大きくなると考えられる。

5. 本同定手法の計算結果

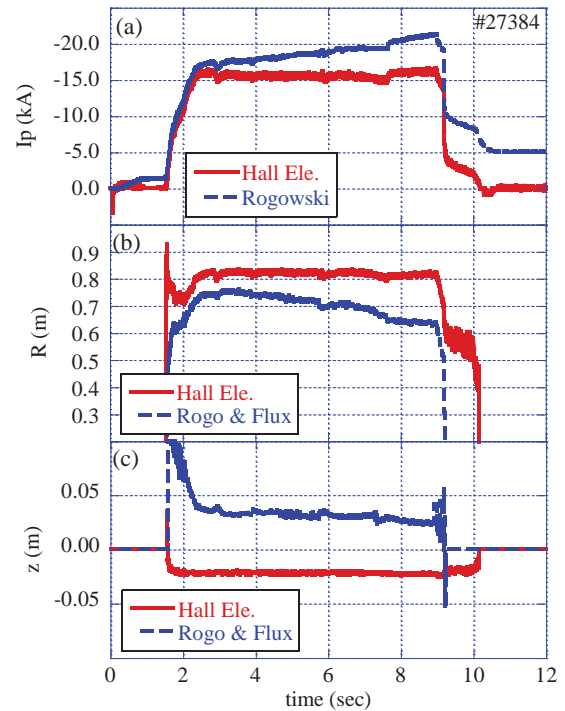


Fig. 5 Comparison of values between hall sensors and time-integrated sensors such as rogowski coil and flux loops on (a) plasma current, (b) radial plasma position, and (c) vertical plasma position.

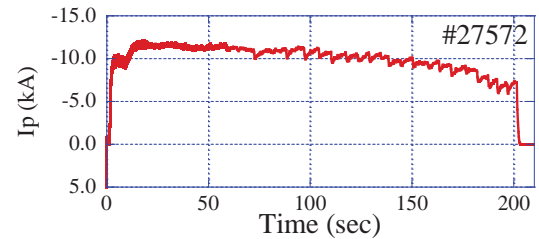


Fig. 6 Plasma current calculated with hall sensors in long-pulse operation.

実験的にリアルタイムに同定したプラズマ電流とその位置の計算結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 にはロゴスキーコイルから求めたプラズマ電流とロゴスキーコイルとフラックスループから求めたプラズマ位置⁴⁾も示している。放電の初期において、ホール素子から求めたプラズマ電流はロゴスキーコイルから求めたものと良く一致している。またプラズマ放電の終了後においてロゴスキーコイルから求めたプラズマ電流はドリフトノイズのためにゼロになっていないが、ホール素子から求めたものは適切にゼロになっている。Fig. 6 に長時間放電時のホール素子から求めたプラズマ電流を示す。放電が 200 秒を超えてもホール素子から求めたものにはドリフトがなく、放電終了後

にプラズマ電流が適切にゼロになっていることがわかる。

5. まとめ

長時間放電のためのホールセンサーを用いたプラズマ電流とその位置の同定手法を提案した。その計算結果はホール素子を外側の 5 個を使うよりも、更に真空容器中心軸上にある 5 個を加えて計 10 個を使用した方が正確であり、また耐ノイズ性も高いことがわかった。ホール素子から求めたプラズマ電流と位置の計算結果は、放電時間が 200 秒程度であったとしても、本質的に時間積分を必要としないホール素子では、ドリフトによる誤差が現れないことを確認した。

ホール素子は真空容器の大気側に設置されている。これは、真空部品を必要とせず、また故障の際には真空容器を大気開放しないで修理できるなど、その計測と保守が簡易に行えるということができる。他方、この計測方法ではプラズマ電流や位置の急な変化が起こったとしても真空容器の渦電流効果で、真空容器の外側に設置されたホール素子ではその急な変化を検出できないという欠点がある。また、真空容器の中心軸上に設置されたホール素子は、PF4 コイルの中心軸上にあり、PF4 コイルを使用するオーミック放電やダイバータ配位での放電では、PF4 コイルによる磁場で検出感度範囲を超えてしまい使用できなくなる。外側 5 個のみでプラズマ電流や位置を同定するにしても、先に述べたように、あまり

良い精度は期待できない。従って、長時間での計測が行えて、かつ速い変化も検出できるようになるには、おそらくホール素子とフラックスループを相補的に使用することが必要になると思われる。また、長時間のダイバータ配位での計測が行えるように、ホール素子の検出感度範囲を超えない新しい設置位置の探索も必要になると考えられる。

参考文献

- 1) D. M. Liu, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **80** (2009) 053506.
- 2) J. G. Bak, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75** (2004) 4305.
- 3) Y. Kawamata, *et al.*, Proc. on 19th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE).
- 4) K. Hanada, *et al.*, Plasma and Fusion Research **5** (2010) S1007.
- 5) K. Hanada, *et al.*, IEEJ Sec. A, **132** (2012) 490-498
- 6) A. Kuzmin, *et al.*, J. Nucl. Mater. (2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.092>
- 7) M. Hasegawa, *et al.*, IEEJ Trans. Fundam. Mater. **132** (2012) 477-484.
- 8) M. Hasegawa, *et al.*, Fusion Eng. Des. **88** (2013) 1074-1077.
- 9) M. Hasegawa, *et al.*, Journal of the Korean Physical Society **65** (2014) 1191-1195.
- 10) <http://www.allegromicro.com/>.