九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

QUEST装置における誘導電場による初期プラズマ生成

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

佐藤，浩之助
九州大学応用力学研究所

花田，和明
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

他

https://doi.org/10.15017/14571

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 28 (4), pp.391-398, 2007-03. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

九州大学大学院総合理工学報告
第28巻　第4号 391-398頁　平成19年3月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
Vol. 28, No. 4, pp. 391-398, MAR. 2007

QUEST 装置における誘導電場による初期プラズマ生成

長谷川　真[*1,†]・中村　一男[*1]・佐藤　浩之助[*1]・花田　和明[*1]・図子　秀樹[*1]
坂本　瑞樹[*1]・出射　浩[*1]・川﨑　昌二[*1]・中島　寿年[*1]・東島　亜紀[*1]

(平成18年12月13日　受理)

Initial Plasma Production by Induction Electric Field on QUEST Tokamak

Makoto HASEGAWA, Kazuo NAKAMURA, Kohnosuke SATO,
Kazuaki HANADA, Hideki ZUSHI, Mizuki SAKAMOTO, Hiroshi IDEI,
Shoji KAWASAKI, Hisatoshi NAKASHIMA, Aki Higashijima
[†]E-mail of corresponding author: *hasegawa@triam.kyushu-u.ac.jp*

Induction electric field by center solenoid coil plays a roll to produce initial plasma. According to Townsend avalanche theory, minimum electric field for plasma breakdown depends on neutral gas pressure and connection length. On QUEST spherical tokamak, a connection length is evaluated as 966m on null point neighborhood with coil current ratio $I_{PF26}/I_{CS} = 0.1$, and induction electric field considering eddy current of vacuum vessel is evaluated as about 0.1 V/m on null point neighborhood. With Townsend avalanche theory, these values manage to produce initial plasma on QUEST.

Key words: *QUEST, Townsend avalanche, Connection length, Induction Electric Field, Eddy current, Filament approximation*

1. 緒　　言

九州大学応用力学研究所炉心理工学研究センターでは、球状トカマク装置であるプラズマ境界力学実験装置 QUEST（大半径 $R = 0.68$ m, 小半径 $a = 0.4$ m, アスペクト比 $A = 1.7$, 楕円度 $\kappa = 1.6$）の建設が始まり、平成 20 年度より稼動する計画である。Fig. 1 に QUST 装置の鳥瞰図とポロイダル断面図を示す。QUEST 装置の運転シナリオでは、長時間連続してプラズマを閉じ込める定常運転と、電子密度等が高いプラズマパラメーターで運転するパルス運転が想定されているが、特にパルス運転では他のトカマク装置と同じ様に Poloidal Field（PF）コイルを用いて真空容器内に周回電圧を生成し Townsend avalanche によって初期プラズマを生成することを計画している。Townsend avalanche によればプラズマのブレークダウンに必要な周回電圧は中性ガス圧と磁力線の連結長に依存している。

そこで本研究では QUEST 装置において磁場配位に応じた連結長と真空容器内に流れる渦電流を考慮した周回電圧を数値計算にて評価し、初期プラズマ生成の実現性を検討する。

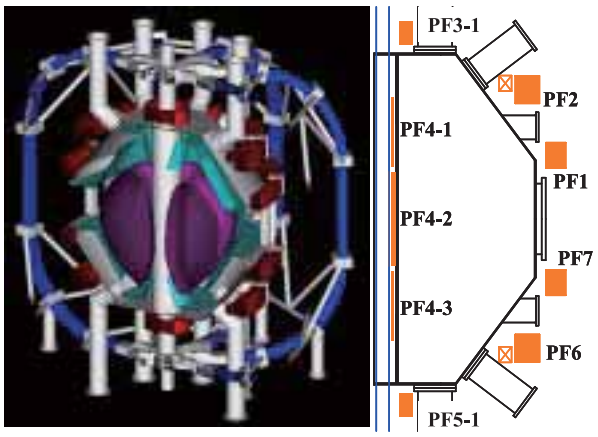

Fig. 1　Left: Birds-eye view of QUEST tokamak
(minor/major radius = 0.4 m/0.68 m,
aspect ratio $A = 1.7$, elongation $\kappa = 1.6$)
Right: poloidal cross section and PF coil positions

*1　応用力学研究所

Townsend avalanche の式によれば電離係数αは、

$$\alpha = Ap\exp(-Bp/E)$$

で与えられ（p:中性ガス圧, E:電場）、係数 A, B はガス種に依存し、水素の場合では A = 3.83 m^{-1}Pa^{-1}, B = 94.0 Vm^{-1}Pa^{-1} である。真空容器内の磁力線の長さを磁力線の連結長 L としてα = 1/L とすれば、水素の場合

$$E_{\min}[\mathrm{V\,m^{-1}}] = \frac{94.0\,p[\mathrm{Pa}]}{\ln(3.83\,p[\mathrm{Pa}]\,L[\mathrm{m}])}$$

となる。この式によれば、プラズマがブレークダウンする最小の電場は、中性ガス圧と連結長に依存している。中性ガス圧は制御可能な量であるので任意の値に設定できる。連結長も磁場配位に依存し、制御可能な量であるが、この磁場配位はコイル設置位置や通電可能なコイル電流値などで変わるため装置毎に異なる。一般に連結長を長く取るために R 方向と z 方向の磁場成分(B_r, B_z)が、(0, 0)となるヌル点を生成する。

プラズマのブレークダウンに必要な電場は PF コイルによる誘導電場を用いる。誘導電場は PF コイル等によって作り出された円環を貫く磁束をϕとして、周回電圧 $v = -d\phi/dt$ から周長を割った値として計算される。ブレークダウンに必要な誘導電場は Electron Cyclotron Heating (ECH)による予備電離を行うことで下げることもでき、多くのトカマク装置で実験がなされているが、DIII-D 装置の場合、D_2 放電において 700 kW, 60 GHz の ECH を用いることで必要な誘導電場を 0.25 V/m から 0.15 V/m まで下げている [1]。QUEST 装置においても予備電離を行う計画であるが、安定してブレークダウンをさせるためには PF コイルで充分大きな誘導電場が得られることが望ましい。しかし得られる誘導電場は多くの装置において上限があり、ITER の場合では、多重巻きの超伝導 PF コイルに印加可能な電圧の制限により、渦電流の効果と合わせると 0.3 V/m (15 V per turn)程度の誘導電場が上限になると見込まれている [2]。また、球状トカマク装置では一般にトーラス内側のスペースが空間的に狭いため、真空容器の周回方向の電気的絶縁を行うことが難しく、磁束ϕを時間変化させたときに、誘導電場の生成を抑えるように真空容器に誘導電流が流れる。このため生成される誘導電場は真空磁場による誘導電場よりも小さい値となる。真空容器に流れる誘導電流は、真空容器の材質や形状、コイルとの相対位置などに依存する。

2. 磁場配位と磁力線の連結長

Fig. 1 に QUEST 装置の真空容器形状とコイル設置位置を示す。真空容器の材質は SUS316L である。Table 1 に各 PF コイルの主要諸元を示す。トロイダル方向の磁場を作り出す Toroidal Field（TF）コイルは８個有り、それぞれ 2turn を有している。

2.1 ヌル点生成のための磁場配位

コイルによって生成される磁場を計算する。(r_0, z_0)の位置にある電流 I の円環電流の(r_1, z_1)におけるベクトルポテンシャルは、

Table 1 PF coil specifications.

		Mode	PF1& PF7	PF2&PF6	PF4-1&PF4-3	PF4-2
R	[m]	pulse	1.500	1.261	0.157	0.163
		steady	1.555	1.312		
Z	[m]		±0.54	±1.100	±0.740	0
Width	[m]		0.164	0.203	0.023	0.034
Height	[m]		0.166	0.229	0.590	0.792
turn		pulse	4	36	77	161
		steady	12	72		
Inductance	[mH]	pulse	0.11	6.05	0.66	2.17
		steady	0.89	23.20		
Resistance	[mΩ]	pulse	0.33	13.3	11.8	12.6
		steady	0.99	26.5		

$$A_\theta = \frac{\mu_0}{\pi k} I \sqrt{\frac{r_0}{r_1}}((1-k^2/2)K(k)-E(k))$$

$$k^2 \equiv \frac{4r_0 r_1}{(r_0+r_1)^2+(z_0-z_1)^2}$$

で与えられ、このとき磁場成分(B_r, B_z)は

$$(B_r, B_z) = \left(-\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial z}, \frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right)$$

$$\Psi = 2\pi r A_\theta$$

で与えられる。ただし、$K(k)$, $E(k)$は第1種，第2種完全楕円積分である。QUEST 装置における PF コイルによる磁場をこれら円環電流の線形結合として近似する。また TF コイルによる磁場を有限長の直線電流群として近似する。

連結長を長く取るためには(B_r, B_z) = (0, 0)となるヌル点を作れば良く、QUEST 計画ではこの磁場配位を PF4-1, PF4-2, PF4-3 コイルを直列に接続したコイル（以下、CS コイル）と、PF2, PF6 を直列に接続したコイル（以下、PF26 コイル）の組合せで作り出す計画である。Fig. 2 に CS コイルと PF26 コイルに単位電流 1 kA を通電した際の赤道面上での B_z分布と、B_z = 0 となる PF26 コイルと CS コイルの通電電流比を示す。コイル設置位置は赤道面に対して上下対称であるので赤道面上では常に B_r = 0 である。

予備電離では 8.2 GHz の ECH を行う計画であり、このときの共鳴磁場は 0.29 T であるので、TF コイルに 95 kA 通電したとすると、共鳴位置は R = 1.05 m となる。Fig. 2 によれば、この位置にヌル点を生成するには、通電電流比を I_{PF26}/I_{CS} = 0.1 にとれば良いことが分かる。この通電電流比で通電した際の QUEST のフラックス図を Fig. 3 に示す。ヌル点近傍で 6 重極を形成していることがわかる。

2.2 磁力線の連結長

ヌル点近傍での磁力線の連結長を評価する。真空容器内の或る磁力線の軌道が、距離のパラメータを s として $\mathbf{r}(s)$ で表されたとすると、

$$\frac{d\mathbf{r}(s)}{ds} = \frac{\mathbf{B}(\mathbf{r})}{|\mathbf{B}(\mathbf{r})|}$$

の関係にあるので、磁力線の連結長はパラメータ s から求めることが出来る。この連立常微分方程式は 4 次のルンゲークッタ法を用いて解いた。Fig. 4 に I_{TF} = 95

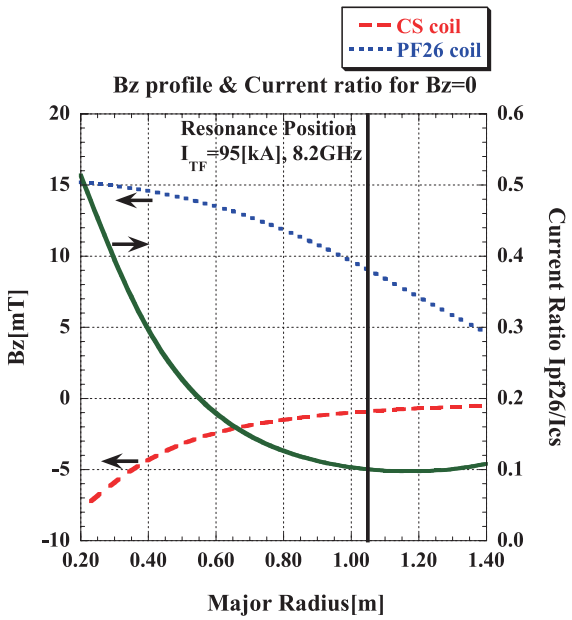

Fig. 2　Bz profile of CS coil and PF26 coil with 1kA, and the coil current ratio (I_{PF26}/I_{CS}) for setting Bz=0.

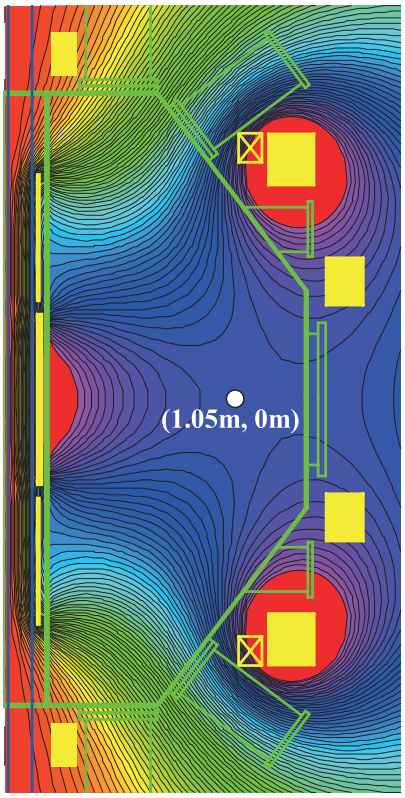

Fig. 3　Poloidal flux profile with I_{PF26}/I_{CS} = 0.1 for setting null point on (R, z) = (1.05m, 0m)

kA, I_{CS} = 35 kA, I_{PF26} = 3.5 kA を通電し、ヌル点近傍の点である(R, z) = (1.05 m, 0 m)を通過する磁力線の軌道を示す。磁力線は、センタースタック下部を始点として、ヌル点近傍でセンタースタックを多く周回し、センタースタック上部を終点としていることが分かる。このとき、連結長は 141 m であった。また、I_{TF} = 95 kA, I_{CS} = 10 kA, I_{PF26} = 1.0 kA の同様の場合では(B_r, B_z)成分が弱くなるので連結長が長くなる。この場合における(R, z)=(1.05 m, 0 m)を通過する磁力線の連結長は 966 m であった。このときの、真空容器内の各点における連結長を Fig. 5 に contour 図として示す。ヌル点近傍の連結長はおよそ 966m 程度を最大にして、急勾配で減少していることが分かる。

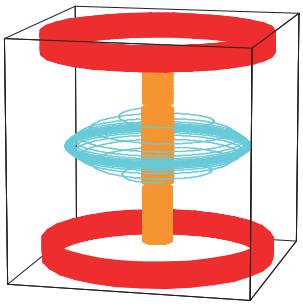

Fig. 4　Trace of magnetic field line, which pass through (R, z) = (1.05 m, 0 m). Two rings are PF2 and PF6 coil, and center cylinder is CS coil (I_{PF26} / I_{CS} = 3.5 kA / 35 kA).

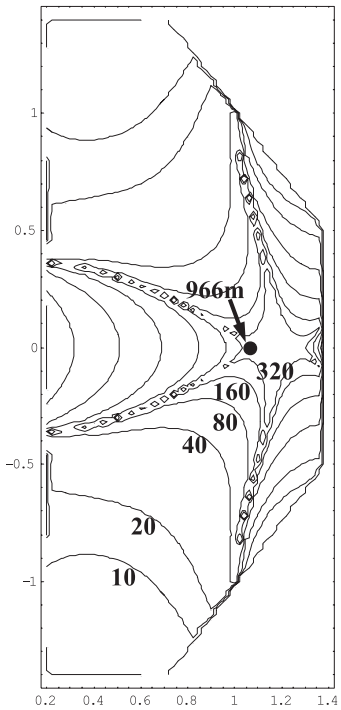

Fig. 5　Connection length profile of QUEST with I_{TF} = 95 kA, I_{CS} = 10 kA, I_{PF26} = 1.0 kA

3. 渦電流を考慮した周回電圧の評価

3.1 計算モデルと計算方法

真空容器に流れる渦電流を評価するために、真空容器を k 個の円環フィラメント群で近似することを考える。このとき、真空容器を模擬したフィラメントは或るインダクタンス値と抵抗値を持った回路とみなせる。ここで、n 番目のフィラメントに流れる電流を c_n とする。次に l 個の PF コイルに通電したとして n 番目の PF コイルに流れる電流を i_n、印加電圧を v_n とする。通電を行う PF コイルとフィラメント全体に対して通し番号をつけると、

$$I = \{\underbrace{i_1, i_2, \cdots, i_l}_{l\text{個}}, \underbrace{c_1, c_2, \cdots, c_k}_{k\text{個}}\}$$

$$V = \{\underbrace{v_1, v_2, \cdots, v_l}_{l\text{個}}, \underbrace{0, 0, \cdots, 0}_{k\text{個}}\}$$

であり、

$$R_{ij} = \begin{cases} R_i & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$$

R_i : i番目のPFコイル、フィラメントの抵抗値

$$L_{ij} = \begin{cases} L_i & (i = j) \\ M_{ij} & (i \neq j) \end{cases}$$

L_i : i番目のPFコイル、及び
　　フィラメントの自己インダクタンス

M_{ij} : i番目とj番目のPFコイル、及び
　　フィラメントの相互インダクタンス

$i, j = 1, 2, \cdots, k + l$

となる行列$[R]$と$[L]$を用いれば PF コイルとフィラメント群を含めた全体の回路方程式が、

$$\frac{dI}{dt} = [L]^{-1}(V - [R]I)$$

で与えられる。自己インダクタンス値 L_iは、PF コイルに対しては設計値を用い、フィラメントに対しては真空容器の板厚程度の導体径 d を持つものとして単位

電流を流したとしたときの半径 $r-d/2$ を貫く磁束として評価する。相互インダクタンス値は、各コイルを貫く磁束を評価することで求めることができる。抵抗値 R_i は PF コイルに対しては設計値を用いた。フィラメントの抵抗値 R は、真空容器の体積抵抗率を ρ としておおよそ $R=\rho(2\pi r)/(\pi(d/2)^2)$ で与えられると考えられる。真空容器の材質であるステンレスの体積抵抗率は、$\rho=72.0\times10^{-8}$ Ωm であり、例として $r=1.0$ m, $d=12$ mm の場合、40 mΩ となる。しかし、抵抗値 R はフィラメント群の近似の粗密等にも依存すると考えられるので、ここでは各フィラメントの抵抗値にフリーパラメータを含ませて評価する。

この連立常微分方程式を 4 次のルンゲークッタ法にて解くことで、フィラメントに流れた電流として真空容器に流れる渦電流が評価できる。渦電流を考慮した周回電圧及び誘導電場は PF コイルに流れた電流と、各フィラメントに流れた電流の総和から評価できる。

3.2 CPD 装置における検証

QUEST 装置よりも小型の球状トカマク装置である小型 PWI 実験装置 CPD が稼動している。この CPD 装置の測定結果を用いて計算モデルの妥当性を評価する。Fig. 6 に CPD 装置の真空容器形状、コイル位置及び代表的なフラックスループの設置位置を示す。まず渦電流による周回電圧の遅延を測定値から評価する。PF26 コイルのみに通電した際の通電電流の微分波形と、測定によるフラックスループ FLS-1 の周回電圧とを Fig. 7 に示す。ただしノイズによる影響を取り除くため、微分波形は数値計算的に 1 kHz のローパスフィルターを通したものを微分している。Fig. 7 によれば、渦電流の効果として通電電流の微分波形と周回電圧の波形の時定数が異なっていることが分かる。従って、渦電流の効果による PF26 コイルから FLS-1 への遅延は、この時定数の差から求めることができ、時定数の差は最小二乗法で求めることができる。Fig. 7 の場合、遅延の時定数は 6.6 msec であった。Table 2 にこのようにして求めた各コイルによる各フラックスループの遅延の時定数を示す。PF コイルとフラックスループの相対距離が離れるに従って時定数が大きくなっていることが分かる。

次に CPD 装置の真空容器形状を互いに距離 10 cm 程度離れたフィラメント群で近似することを考える。近似したフィラメント群の位置を Fig. 6 に表す。真空容器にはポート等があるためフィラメント群で近似したときに、各フィラメントにおいて異なった抵抗値をもつことが予想され、フィラメント毎の抵抗値に異な

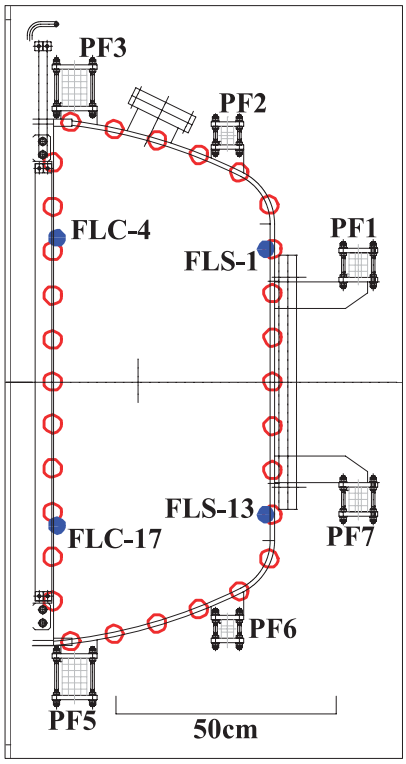

Fig. 6　Poloidal cross section of CPD device
Dots(●) and circles(○) are positions of flux loops and filaments, respectively.

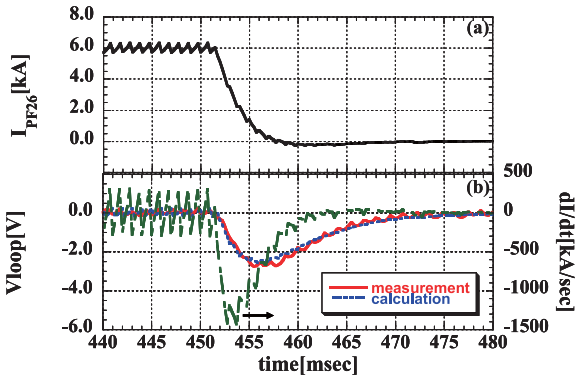

Fig. 7　(a) PF26 coil current, (b) derivative of PF26 coil current (right axes), and loop voltages (left axes) of experimental measurement (line) and calculation (dashed line)

Table 2 Decay time constant of flux loop defined by experimental measurement

	FLC−4	FLC−17	FLS−1	FLS−3
PF17	6.9	6.9	3.9	3.9
PF26	6.6	6.6	6.6	6.6
PF35	5.1	5.1	7.8	7.8

(msec)

ったフリーパラメータを含ませることが望ましい。しかし、ここでは単純に全てのフィラメントの抵抗値が $R = f\ \rho(2\pi r)/(\pi(d/2)^2)$ の形で表されるものとして、全体で一つのフリーパラメータ f を持つものとして、Table 2 と同程度の時定数を持つように f の値を調節する。ここで、d は真空容器の板厚である。

Fig. 8 に PF26 コイルに単位電圧 1 V を矩形に印加したときのフラックスループ FLS-1 におけるフラックスを示す。ただし、$f = 0.056$ とした。PF26 コイルのインダクタンス値が約 160 mH であり、抵抗値が約 6.2 mΩ であるので、渦電流を考慮しないものは全体として約 26 msec の時定数で FLS-1 のフラックスが増えていることがわかる。これに比して考慮するものは時定数が僅かに遅く、この時の時定数の差である遅延は、7.9 msec であった。Table 3 に $f = 0.056$ としたときの遅延の時定数をしめす。Table 2 と同様に、PF コイルとフラックスループの相対距離が離れるに従って時定数が大きくなっているが、Table 2 と比較して各々の比が異なっている。これはポート等の効果を考慮せず、全てのフィラメントで共通のパラメータ f を用いているためと考えられる。また、$f = 0.056$ という値のオーダーは、距離が 10 cm 毎離れたフィラメント群と近似をしたので、フィラメントの断面積 $\pi(d/2)^2$ と縦 10 cm 横 d との面積比のオーダーに等しいと予想される。実際、$d = 10$ mm とすると、面積比は 0.079 となる。

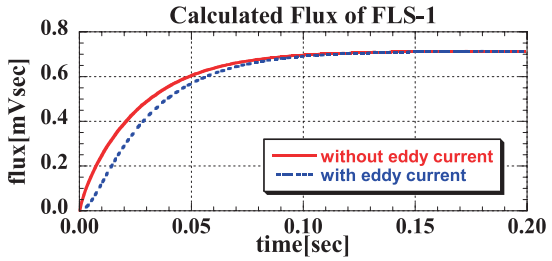

Fig. 8 Flux loop of FLS-1 calculated by filament approximation without (line) and with (dashed line) eddy current.

Table 3 Decay time constant of flux loop calculated by filament approximation (free parameter value $f = 0.056$)

	FLC−4	FLC−17	FLS−1	FLS−3
PF17	6.9	6.9	6.1	6.1
PF26	5.4	5.4	7.9	7.9
PF35	3.4	3.4	8.8	8.8

(msec)

3.3 QUEST 装置における周回電圧

QUEST 装置においても真空容器形状を互いに距離 10 cm 程度離れたフィラメント群で近似する。各フィラメントの抵抗値を $R = f\ \rho(2\pi r)/(\pi(d/2)^2)$ として、f の値を CPD 装置の場合で求めた f=0.056 とする。初期状態として I_{CS} = 10 kA を定常に流した状態から、CS コイルの印加電圧を矩形でゼロボルトにするものとする。このときの計算結果を Fig. 9 に示す。CS コイルの抵抗値が 36 mΩ であり、インダクタンス値

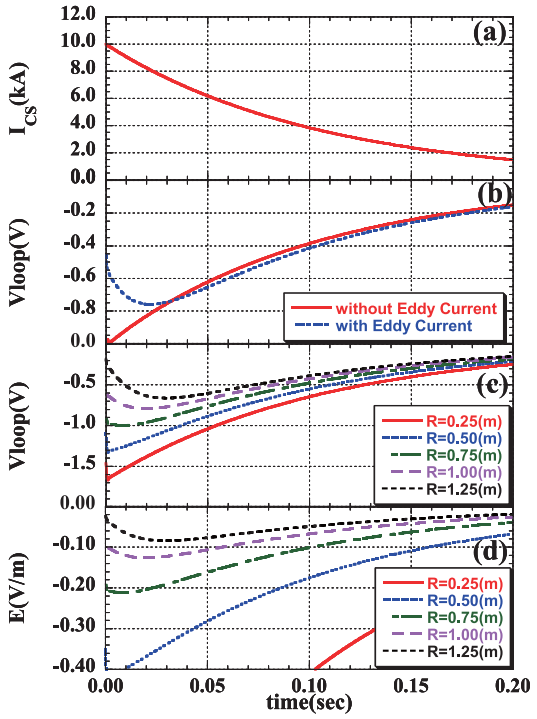

Fig. 9 (a) CS coil current, (b) Loop voltage at R=1.05m without (line) and with (dashed line) Eddy current, (c) Loop voltages of several points (z=0) with Eddy current, (d) Calculated toroidal electric field of several points.

が 3.8 mH なので、全体として約 0.1 sec の時定数で I_{CS} が減少している。Fig. 9(b)は R = 1.05 m において渦電流を考慮したものとしないものの場合の周回電圧である。渦電流を考慮した場合、周回電圧のピーク値を下げていることが分かる。Fig. 9(c)は渦電流を考慮した大半径 R の各点における周回電圧であり、大半径が大きくなるに従い周回電圧が下がっていることが分かる。これはトロイダル方向の電場に換算すると、更にその傾向が強まることが Fig. 9(d)から分かる。

4. QUEST における初期プラズマ生成

現在までの検討から、連結長が 500 m～1000 m であることと、R = 1.05 m の共鳴点近傍でのトロイダル方向の電場が 0.1 V/m 程度であることが分かった。Fig. 10 に Townsend avalanche の式を示し、QUEST 装置での運転領域を示す。Fig. 10 によると、OH のみによる初期プラズマ生成では比較的限られた運転領域であることが分かる。

ブレークダウンに RF のアシストを用いる実験では、DIII-D 装置の場合、D_2 放電にて 700 kW, 60 GHz の EC を用いて 0.25 V/m から 0.15 V/m までブレークダウン電場を下げることが出来ている [1]。また JT-60U 装置では、OH 単体での典型的なブレークダウン電場が 0.8 V/m であるのに対して、1.5 MW, 1.7-2.4 GHz の低域混成波(LH)のアシストにより 0.12 V/m でブレークダウンが出来ている [3]。Fig. 10 に DIII-D 装置と JT-60U 装置の運転領域を示す。

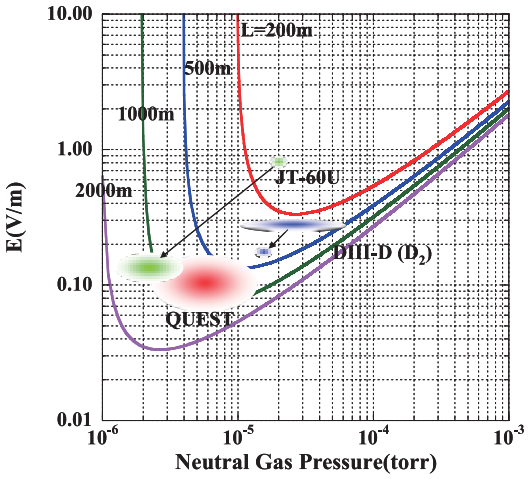

Fig. 10　Minimum electric fields for Townsend avalanche breakdown. Data for plasma initiation in JT-60U[3], DIII-D[1], and QUEST are superposed.

5. 結論と今後の展開

連結長と周回電圧を評価し QUEST 装置の初期プラズマ生成について検討をおこなった。それによれば、連結長は 500～1000 m であり、共鳴点近傍の電場は 0.1 V/m 程度であり、比較的限られた運転領域で初期プラズマの生成をする必要があるだろうことが分かった。しかし、評価の条件として、例えば CS コイルに両極性電源をつなぎ、CS コイルへマイナスの電圧を印加すれば、誘導電場は 0.1 V/m 程度よりも大きくなり、運転領域は広がるだろうことは想像に難くない。また、QUEST 装置においても 8.2 GHz の EC のアシストを用いることでブレークダウン電場を下げ、運転領域を拡大することは充分可能であると考えられる。これら条件の更なる精査は今後の課題である。

また、本研究では初期プラズマの生成について焦点をあてたが、実際には更に後に、プラズマ電流の立上げをする必要がある。これを行うためには、プラズマ電流の生成と共に、プラズマ電流と平衡が取れる垂直磁場を PF コイルによって印加していく必要がある。この際にも渦電流によって、目標とする垂直磁場に到達するのに遅延が生じる。このような PF コイルの制御性等の検討も今後の課題である。

参考文献

1) Lloyd, B., et al., Nucl. Fusion **31** (1991) 2031

2) ITER JCT, Technical Basis for ITER Final Design Report, Cost Review and Safty Analysis (FDR), in ITER/EDA Documentation Series, IAEA, Vienna (1999)

3) Yoshino, R., Seki, M., Plasma Phys. Control. Fusion **39** (1997) 205