

REBCO コイルを用いた高温超伝導 ECR イオン源の開発 DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ECR ION SOURCE WITH REBCO COILS

荘俊謙^{*A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 神田浩樹^{A)}, 畑中吉治^{A)}, 斎藤高嶺^{A)}, 安田祐介^{A)}, 長屋重夫^{A)}, 森田泰之^{A)},
武田佳次朗^{A)}, 原隆文^{A)}, Zhao Hang^{A)}, 橘高正樹^{A)}, 松井昇太郎^{A)}, 石山敦士^{B)}, 野口聡^{C)}, 植田浩士^{D)},
福井聡^{E)}, 松原雄二^{F)}, 三上行雄^{F)}, 吉田潤^{F)}, 平山貴士^{F)}, 渡部智則^{G)}
Tsun Him Chong^{*A)}, Mitsuhiro Fukuda^{A)}, Tetsuhiko Yorita^{A)}, Hiroki Kanda^{A)}, Kichiji Hatanaka^{A)}, Takane Saitou^{A)},
Yusuke Yasuda^{A)}, Shigeo Nagaya^{A)}, Yasuyuki Morita^{A)}, Keijiro Takeda^{A)}, Takafumi Hara^{A)},
Hang Zhao^{A)}, Masaki Kittaka^{A)}, Shoutaro Matsui^{A)}, Atsushi Ishiyama^{B)}, Sou Noguchi^{C)}, Hiroshi Ueta^{D)},
Sou Fukui^{E)}, Yuji Matsubara^{F)}, Yukio Mikami^{F)}, Jun Yoshida^{F)}, Takashi Hirayama^{F)}, Tomonori Watabe^{G)},

^{A)} Research Center of Nuclear Physics, Osaka University

^{B)} Waseda University ^{C)} Hokkaido University ^{D)} Okayama University ^{E)} Niigata University

^{F)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd., ^{G)} Chubu Electric Power Co., Inc.

Abstract

A High Temperature Superconducting ECR ion source (HTS-ECR) is under development in RCNP, Osaka University. The magnetic mirror and sextupole fields of HTS-ECR will be produced by three circular and six racetrack REBCO coils respectively. Performance tests of the second-generation high temperature superconducting coils were positioned as a key technology development of the skeleton cyclotron, an air-core compact accelerator using REBCO coils as main magnets. The HTS-ECR was designed for both 2.45 GHz and 10 GHz operation in order to estimate the coils' capability of modifying magnetic field configuration in a short time. In this work, results of the low temperature performance test of the REBCO coils will be presented. Besides, the magnetic field configuration and plasmas chamber design for both 2.45 GHz and 10 GHz operation, aimed for high intensity proton, deuteron and He²⁺ production, will be discussed.

1. はじめに

大阪大学核物理研究センターでは、アルファ線核医学治療のための At-211 の安定供給に向けた研究開発が行われている。そこで大きな課題が二つある。一つは一般病院に設置でき、且つ At-211 を始めた多様な RI を製造できる小型加速器スケルトンサイクロトロンの開発であり [1]、もう一つは At-211 を ²⁰⁹Bi($\alpha, 2n$)²¹¹At 反応から製造するために大電流の He²⁺ ビームの確保である。

スケルトンサイクロトロンは高温超伝導 REBCO コイルで磁場を構築する予定だが、REBCO コイルはまだ実用化されておらず、性能試験が必要である。一方、He²⁺ を最優先に大電流化を実現したイオン源もまだこの世にない。そこで本研究は REBCO コイルの性能試験を兼ねて、REBCO コイルを用いて大電流 He²⁺ ビームを目指した ECR イオン源 (HTS-ECR) を開発する。本論文はその REBCO コイルの性能試験を報告し、HTS-ECR の磁場およびプラズマチャンバ設計をまとめる。

2. HTS-ECR の電磁石

2.1 第二世代高温超伝導 REBCO 線材

REBCO 線材は第二世代高温超伝導線材と呼ばれ、銅酸化物超伝導体 (REBa₂Cu₃O_{7-x}, RE=rare earth) の略である。臨界温度が 90 K 以上であり、一枚の厚さ

が約 0.1 mm であることから、REBCO 線材を使えばコンパクトな電磁石で強磁場を構築することが可能である。さらに、REBCO 線材は超伝導材の臨界電流を大きく制限するテープ面に垂直な磁場に強い耐性を持つ [2]。このような特性から、大阪大学 RCNP では REBCO 線材でコイルを作り、それを用いた ECR イオン源の開発が進んでいる。

2.2 HTS-ECR の REBCO コイル

大阪大学 RCNP では REBCO 線材を用いて、3 つの円形ミラーコイルおよび 6 つのレーストラックがた 6 極コイルを製作した。Figure 1 はそれを示している。

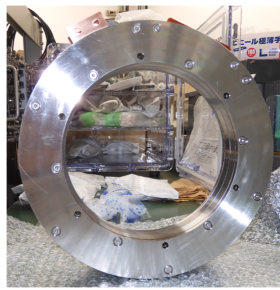
ミラーコイルと 6 極コイルの性能は Table 1 で示されている。

Table 1: Specialties of REBCO solenoid coil and sextupole coil.

	ミラーコイル	6 極コイル
線材幅	12 mm	6 mm
最小曲率半径	~95 mm	25 mm
臨界電流	>500 A at 30 K	>250 A at 30K

Figure 2 は製作した 3 つのミラーコイル (M1 コイル、PC コイル、M2 コイル) と 6 極コイルのそれぞれのターン数、およびそれらを組み立てたコイルアセンブリを示している。ミラーコイルは上流側から M1 コイル、PC コイル、M2 コイルと名付けられており、

* oscar@rcnp.osaka-u.ac.jp



(a) REBCO solenoid coil.



(b) REBCO sextupole coil

Figure 1: Solenoid coil and sextupole coil fabricated using High temperature Superconductor REBCO tape.

それぞれダブルパンケーキ構造を持っている。中では M1 コイルはダブルパンケーキを二つ持ち、上流側で磁場ピークを構築する。6 極コイルはミラーコイルの間に挿入され、プラズマチェンバーの中心部の磁場が最小となるような min-B configuration 磁場構造を構築する。

Table 2: Specialties of HTS-ECR

粒子種類	陽子、重陽子、He ²⁺
冷却方式	GM 冷凍機
運転温度	20~30 K
運転周波数	2.45 GHz と 10 GHz
加速電圧	50 kV

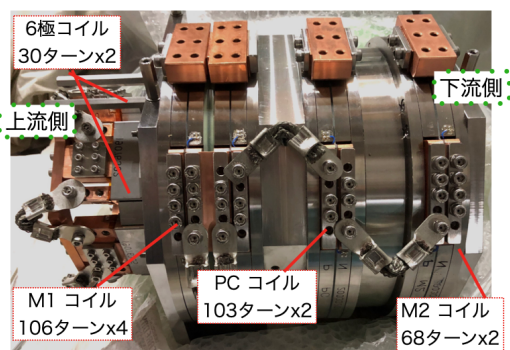


Figure 2: Coil assembly of HTS-ECR

HTS-ECR はこのコイルアセンブリを電磁石として使い、イオンビームを提供する予定である。多様な RI 製造の需要を満たすために、HTS-ECR は He²⁺ の大電流化を優先しながら、陽子、重陽子と He²⁺ のビームを提供する予定である。運転温度は 20~30 K を想定しており、広い温度マージンでクエンチを防ぐ。さらに、REBCO コイルをスケルトンサイクロトロンに用いる時は加速粒子に応じて磁場を切り替える必要があるため、REBCO コイルの磁場切り替え能力を検証するために HTS-ECR は 2.45 GHz と 10 GHz の二つの運転周波数を想定し、周波数に合わせて磁場を切り替える予定である。Table 2 は HTS-ECR の性能をまとめている。

2.3 REBCO コイルの 31 K 低温性能試験

REBCO 線材は高い性能を持っているが、それがまだコイルとして実用化されていないので、我々は製作した REBCO コイルに対して低温性能試験を行った。試験はミラーコイルおよび 6 極コイルを個別にクライオスタットに入れ、31 K の低温環境で電流を繰り返し増減させた。Figure 3 はミラーコイル (M2)

の試験結果を示している。

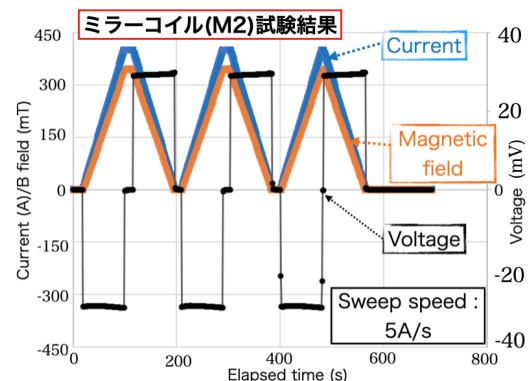


Figure 3: 31 K low temperature performance test result of M2 coil.

Figure 3 では、増減する電流に対して、コイル中心の磁場は線形的に増減することがわかる。コイルの電圧変化は自己インダクタンスによるもののみで、常伝導状態転移による電圧上昇が見られなかった。他のミラーコイルに対しても似た試験結果が得られた。

同様な性能試験を 6 極コイルにも行って、その結果は Fig. 4 に示されている。

Figure 4 では、ミラーコイルの試験結果と同じ、コイル中心の磁場は印加電流と線形的に変化し、常伝導転移による電圧上昇が見られなかった。他の 6 極コイルにも似た性能試験結果を得た。これにより、製作した REBCO コイルは磁場構築能力が高い安定性と再現性を持っていることがわかる。

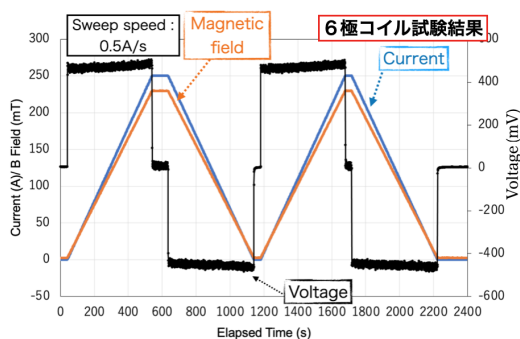


Figure 4: 31 K low temperature performance test result of one of the sextupole coil.

3. HTS-ECR の磁場設計

3.1 HTS-ECR の磁場

HTS-ECR のイオン生成効率を最大化するために、Opera-3D による磁場計算を行った。設計した磁場とそれに対応するコイル電流 Fig. 5 と Table 3 に示されている。

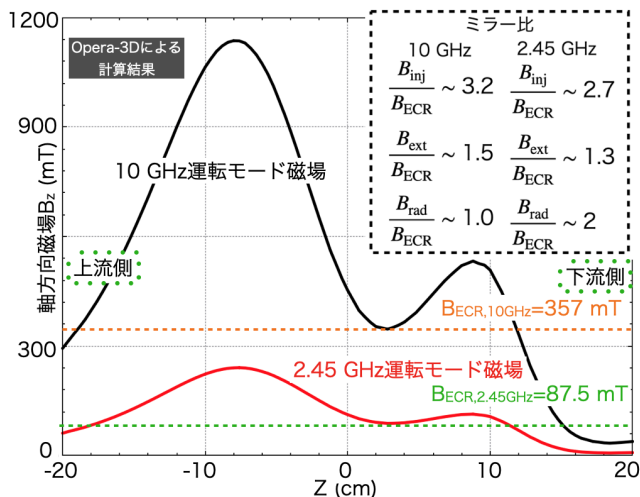


Figure 5: The designed magnetic field of HTS-ECR and its mirror ratio.

Table 3: Coil current corresponds to the designed magnetic field.

	10 GHz 運転	2.45 GHz 運転
M1 コイル電流値	500 A	101.8 A
PC コイル電流値	-580 A	-66.6 A
M2 コイル電流値	500 A	103 A
6 極コイル電流値	250 A	250 A

HTS-ECR では、10 GHz と 2.45 GHz 運転モードの両方にミラー磁場を構築する予定である。から、設計した磁場に対応するコイルの電流値がわかる。10

GHz と 2.45 GHz の両方の運転モードで、M1 と M2 コイルは上流と下流側の磁場ピークを作り、PC コイルでは逆方向に電流を流し磁場の谷を作る。そのミラー比は Fig. 5 に示されているが、そこでは B_{ECR} は共鳴磁場であり、 B_{inj} は上流側ピーク磁場、 B_{ext} は下流側ピーク磁場、 B_{rad} はチェンバー壁における半径方向の磁場である。

3.2 磁場の設計概念

Figure 5 で示している磁場の設計概念をこのセッションで示す。PC コイルの電流は磁場の谷がそれぞれの運転モードの共鳴磁場に触れるように調整している。それは ECR プラズマの中で、電子が共鳴点から得られるエネルギーは電場の 2 乗に比例し、磁場の勾配に反比例するからである [3]。それを式で書くと、式 1 になる。

$$W \propto E^2 / (\Delta B / \Delta z) \quad (1)$$

ここで W は電子が吸収するエネルギーであり、 E は共鳴点での電場強度であり、 $(\Delta B / \Delta z)$ は共鳴点での磁場勾配である。ミラー磁場の谷では磁場の勾配はほぼゼロなので、共鳴点を磁場の谷に置くことで電子が ECR 共鳴から得られるエネルギーが最大になると期待できる。

ECR イオン源のイオン化効率が式 1 だけに依存するわけではない。磁化プラズマの中では、入力マイクロ波は 4 つの基本波 (R 波、L 波、X 波、O 波) に分解することができる。中で ECR 共鳴を通して電子にエネルギーを与えるのが R 波だけであり、R 波の分散関係は式 2 で示されている [3]。

$$\frac{k^2}{k_0^2} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - \omega_{ce})} \quad (2)$$

ここで k_0 はマイクロ波の真空での波数で、 k はマイクロ波の磁化プラズマでの波数で、 ω_{pe} はプラズマ振動数で、 ω は入力マイクロ波の角周波数で、 $\omega_{ce} = qB/m$ は電子のサイクロトロン振動数である。式 2 の k がゼロになると、R 波は進まなくなり、いわゆる臨界密度による cut-off である [4]。この cut-off は ECR イオン源の効率は大きく制限するため、避ける必要がある。cut-off の条件は式 2 の右辺がゼロになることであり、それを以下のように書ける。

$$\omega = (\omega_{ce} + \sqrt{\omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}) / 2 \quad (3)$$

式 3 が成り立つと、イオン源の中の R 波は cut-off される。それを避けるためには、サイクロトロン周波数 ω_{ce} が入力マイクロ波の角周波数 ω より大きい状態を維持しなければならない。サイクロトロン周波数は磁場強度に比例するため、cut-off を避ける条件は言い換えると、チェンバーの全領域で磁場が臨界磁場より高ければ ($B > B_{ECR}$) R 波の cut-off がなくなり、ECR 共鳴を効率よく起こすことができる。

このように、マイクロ波の cut-off を避けながら電子の得られるエネルギーが最大となるよう、HTS-ECR の磁場は Fig. 5 のように設計された。

4. プラズマチェンバー設計

4.1 プラズマチェンバーの最適化

ECR イオン源ではイオン化はプラズマチェンバーの中で起こる。HTS-ECR の場合、REBCO コイルの磁場切り替え能力を検証するために、ビーム種類によってイオン源の運転モードを 2.45 GHz と 10 GHz の間で切り替える予定である。それを実現するために、HTS-ECR は二つの運転周波数で共用できるプラズマチェンバーを設計した。

ECR イオン源のプラズマチェンバーの寸法は入力マイクロ波の共振条件で決定することが多い。それはマイクロ波が共振すれば強い電磁場を生成でき、効率的にイオン化を起こせるからである。円筒型チェンバー内のマイクロ波の TE モード共振条件は以下のように与えられる。

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{j'_{mn}}{r}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (4)$$

式 4 では、 f はマイクロ波の周波数であり、 j'_{mn} は m 次ベッセル関数の導関数の n 番目の零点であり、 r はチェンバーの半径で、 d はチェンバーの長さである。 m 、 n 、 p は共振のモードを示すものである。式 4 を満たす寸法を持つチェンバーであれば、マイクロ波はチェンバー内で定在波を作り、強い電磁場を生成する。運転モードを切り替えるために、HTS-ECR のプラズマチェンバーは f が 2.45 GHz と 10 GHz の時の両方が式 4 を満たすような寸法を持っていないなければならない。

式 4 を 2.45 GHz と 10 GHz の周波数に対して計算すると、以下ようになる。

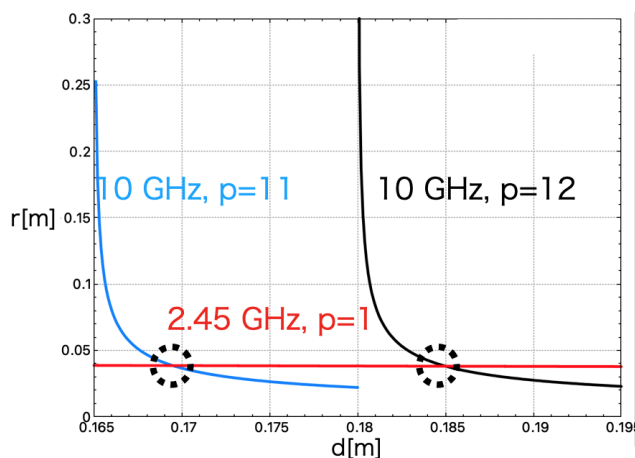


Figure 6: Chamber resonance criterion for 2.45 GHz and 10 GHz frequency operation.

Figure 6 では、横軸がチェンバー長さ、縦軸はチェンバーの半径である。青線は 10 GHz で $p = 11$ の時、黒線は 10 GHz で $p = 12$ の時、赤線は 2.45 GHz で $p = 1$ の時共振条件を満たしているチェンバーの寸法を表している。Figure 6 より、寸法が半径 38 mm 長

さ 185 mm 付近、そして半径 38.4 mm 長さ 169 mm 付近のプラズマチェンバーは二つの周波数運転モードで共振条件を満たすことがわかる。

共振条件を満たす寸法の付近で Ansys HFSS で計算を行い、HTS-ECR のプラズマチェンバーは半径 38 mm、長さ 184.5 mm に決定された。その電場強度は図 7、図 8 で示されている。

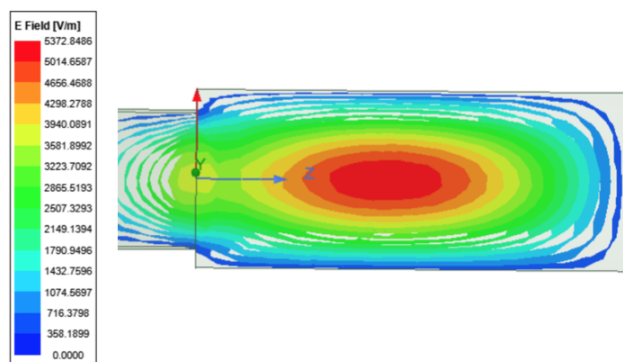


Figure 7: Electromagnetic field inside HTS-ECR plasma chamber in 2.45 GHz operation mode, with 1 W microwave input.

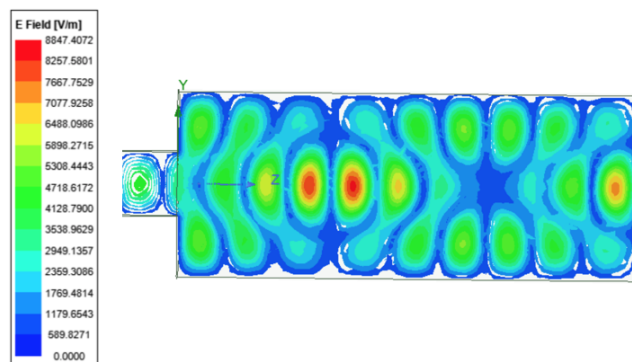


Figure 8: Electromagnetic field inside HTS-ECR plasma chamber in 10 GHz operation mode, with 1 W microwave input.

図 7 は 2.45 GHz 運転モードで 1 W マイクロ波入力の際の電場強度を示している。ピークの電場強度は約 5300 V/m である。図 8 は 10 GHz 運転モードで 1 W マイクロ波入力の際の電場強度を示しており、ほとんどの範囲で 5300 V/m の強度を持つことがわかる。

4.2 プラズマチェンバー設計の評価

図 7、図 8 から HTS-ECR がチェンバー内で作れる電場強度がわかる。Cannobio's Theory によると、ECR イオン源で電子が共振ゾーンを通過する時得られる最大のエネルギー [5] は以下のように書ける。

$$W_{\max} = 1.5 \times 10^9 \left(\frac{E(\text{Vcm}^{-1})}{\omega} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

式5では、 E は電場強度であり、 ω はマイクロ波の周波数であり、 W_{\max} は電子が得られる最大エネルギーである。ここで言う最大エネルギーは電子のエネルギー分布の尻尾の位置に対応するエネルギーのことであり、ほとんどの電子は W_{\max} より少ないエネルギーを得ることを意味する。

HTS-ECR のチェンバー内の電場強度を式5に代入し計算すると、18 W 運転の場合、2.45 GHz と 10 GHz 運転モードで電子はそれぞれ 30,000 eV と 12,000 eV までのエネルギーが得られることがわかる。陽子と He^{2+} のイオン化エネルギーが 14 eV と 54 eV を考えると、陽子と He^{2+} の大量生成が期待できる。これより、HTS-ECR のプラズマチェンバー設計は十分な強度の電場を生成できていることがわかる。

5. まとめと展望

高温超伝導 REBCO コイルの性能検証および大強度 He^{2+} ビームの確保という二つの目標のもとで、HTS-ECR の開発が行われている。大阪大学 RCNP では REBCO 線材を用いたミラーコイルと 6 極コイルを製作し、31 K 低温性能試験でその励磁能力の安定性と再現性を検証できた。また、HTS-ECR の電子加熱の効率最大化を目指し、2.45 GHz と 10 GHz の二つのモードでそれぞれのミラー磁場を設計した。磁場切り替えに対応するための 2.45 GHz と 10 GHz モードの共用プラズマチェンバーの寸法も決定し、その電磁場が陽子と He^{2+} の大量生成が可能であることを検証した。

本研究の展望として、まず REBCO コイルの性能のさらなる検証がある。上述のように、超伝導材の臨界電流はその線材に垂直な磁場成分に大きく制限される。それをイオン源や加速器で用いる場合、コイル自身の磁場だけでなく、他のコイルが作る外部磁場への耐性も考慮しなければならない。本研究ではこれからコイルアセンブリで性能試験を行い、REBCO コイルの性能をさらに検証する。また、HTS-ECR を実用化するためには、運転に必要なクライオスタットの製作が必要であり、それは来年度までに完成する予定である。

6. REBCO コイル

本 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 用テンプレートは、羽島良一氏（日本原子力研究開発機構）が JACoW の $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 用テンプレートを元に 2004 年に作成したリニアック技術研究会論文用 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ファイル [6] 及びクラスファイルを、加速器学会の書式に合うように修正したものです。

本テンプレートは、本文が記載された $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ファイル `TeXtemplate2022.tex`、および書式の細部が記述されたクラスファイル `PASJ2020.cls` そして画像ファイル `JACpic_mc.pdf`, `chart.png`, `chart2.jpg` から成っています。論文執筆にあたっては、`TeXtemplate2022.tex` ファイルに直接書き込むか、別のテキストを挿入するのが一番簡単です。本テンプレートのエンコーディングは UTF-8、改行は LF です。エンコーディングを変更されたい方は `mi` [7] 等のテキストエディタを使用してエンコーディングを変更して下さい。

原稿は、2~5 ページで執筆してください。

書式の詳細や書き方の注意は、第 7 章に記載されています。また、JACoW の web ページ [8] には、論文執筆に役に立つ情報が多く記載されていますので、是非参考にしてください。

7. 原稿の書式と書き方

7.1 用紙の設定

用紙の大きさは A4、本文は二段組（2 カラム）とします。余白等の詳細は Table 4 および Fig. 9 の通りです。

Table 4: Document Layout

Paper size	A4 (210 mm × 297 mm)
Margin	Top : 37 mm, Bottom : 19 mm Left : 20 mm, Right : 20 mm
Column	2 columns Width : 82.5 mm, Spacing : 5.0 mm

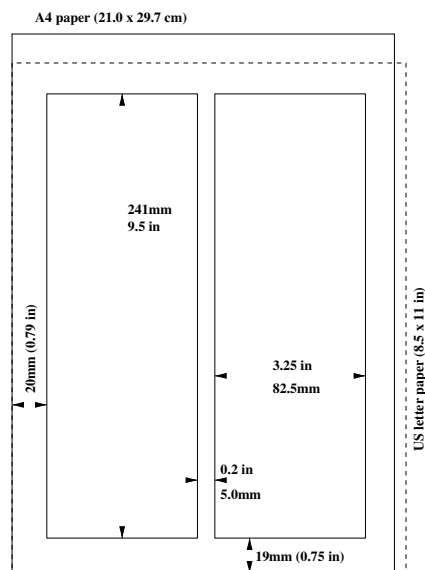


Figure 9: Document layout.

7.2 スタイルと使用フォント

フォントは、図も含めて、できるかぎり明朝 (Mincho) 系、ゴシック (Gothic) 系、Times 系に限定してお使いください。Lua $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ では `\usepackage{luatexja-fontspec}` でフォントを指定出来ます。本テンプレートでは日本語メインフォントを IPAex 明朝 (但し太字は IPAex ゴシック) 日本語サンセリフフォントを IPAex ゴシックとしています。フォントが PC 内に存在しない場合は他のフォントを使用して下さい。

尚、日本語 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ のフォントファミリーは明朝系 (セリフ/メイン) 及びゴシック系 (サンセリフ) の 2 つで、フォントシリーズは標準 (Medium) のみ、太字 (Boldface) はありません。英数字のフォントファミ

Table 5: Definition of Text Styles

Style	Fontfamily	Fontseries	Fontsize	Size name	Baselineskip
Japanese title	Sans(Gothic)	Medium	14 pt	Large	19.6 pt
TITLE	Main(Times)	Boldface	12 pt	large	16.7 pt
Japanese author	Main(Mincho)	Medium	10 pt	authorf	16 pt
Author	Main(Times)	Medium	10 pt	authorf	16 pt
Section title	Sans(Gothic)	Medium	12 pt	large	16.7 pt
Subsection title	Main(Mincho)	Medium	10 pt	normalsize	14 pt
Text	Main(Mincho)	Medium	10 pt	normalsize	14 pt
Table title	Main(Times)	Medium	10 pt	normalsize	12 pt
Figure caption	Main(Times)	Medium	10 pt	normalsize	12 pt
Table	Main(Times)	Medium	9 pt	tabsmall	16 pt
References	Main(Mincho)	Medium	9 pt	small	11 pt
References(URL)	Mono(LMMono)	Medium	9 pt	small	11 pt

りは Times 系を使ってください。αβγ等のギリシャ文字には数式モード α β γ を使用して下さい。

本テンプレートの書式は Microsoft Word 用に定義されたスタイルに準じていますが、完全に同じではありません。スタイル毎のフォントのサイズや行間については、Table 5 にまとめられています。

PDF に出力した時の 1 行の高さが Word とほぼ同じになるように、クラスファイル中でフォントサイズ Large, large, normalsize, tabsmall など再定義しています。

7.3 論文題名・著者・要旨

論文題名および著者名は、日本語英語併記となりますので十分ご注意ください。ただし、著者所属および要旨は従来通り、英文のみです。

書式は以下の通りです。

- 日本語論文題名はゴシック系 14 pt、すぐ次の行に英語論文題名を全て大文字で Times 系太字 12 pt、文字間隔は 6 pt。
- 日本語著者名、英語著者名、英語所属機関名の順に、それぞれを改行で区切り、頭文字のみ大文字。フォントサイズは専用に PASJ2020.cls でサイズ 10 pt、行間 16 pt の authorf を定義している。著者名の区切りは日本語、英語とも半角カンマ（その後に半角スペース 1 個が伴う）。
- 所属機関の所在地は不要。
- 所属機関が複数の場合は、A, B, ... と半角 Times 系フォントで上付参照記号を振って下さい。
- 代表者の電子メールアドレスを脚注に記載する場合は、例のように上付参照記号 *, †, ‡ 等を付けてください。
- 要旨は英語で記述し、改行なしの一段落のみ。イタリックで *Abstract* と見出しをつけること。

7.4 本文

本文は二段組で記述します。フォントは、10 pt の明朝系を使用してください。必要に応じて、ゴシッ

ク系を適宜使用してください。数値と単位記号の間には non-breaking space（半角のチルダ記号）を挿入してください。

7.5 章・節の見出し

各章の見出し、節の小見出しには必ず番号を付けてください。見出しのフォントはゴシック系 12 pt を、小見出しは明朝系 10 pt をお使いください。

尚、本テンプレートでは、見出し、小見出しに自動的に番号を振るようになっています。

7.6 箇条書き

箇条書きの部分は、`\begin{Itemize}`および`\end{Itemize}`ではさってください。

Itemize を itemize とすると、各項目の間隔が広くなります。

7.7 図表の挿入

図および表とそれらの説明文（キャプション及びタイトル）は英語で記述してください。

注意点は以下の通りです。

- Figure Caption 及び Table Title の始まりを、図は「Figure 9:」、表は「Table 4:」などとし（数字の前とコロンの後に半角スペースを入れる）、「Fig. 9:」等は不可とする。
- Table の Title 記述にあたってはキャピタライゼーション・ルールに関する解説（[9]のTitlesの項目）を参考に、
 - 1) タイトルの始めと終わりの単語の頭文字を大文字
 - 2) 名詞、代名詞、動詞、形容詞、従属接続詞、副詞は、頭文字を大文字
 - 3) 冠詞、等位接続詞、前置詞と不定詞の to を小文字を基本とする。
- Table 4 の例では、表本体の部分を `\begin{tabsmall}`および`\end{tabsmall}`ではさみ、フォントサイズを小さめ（9 pt）、1 行を広め（16 pt）に指

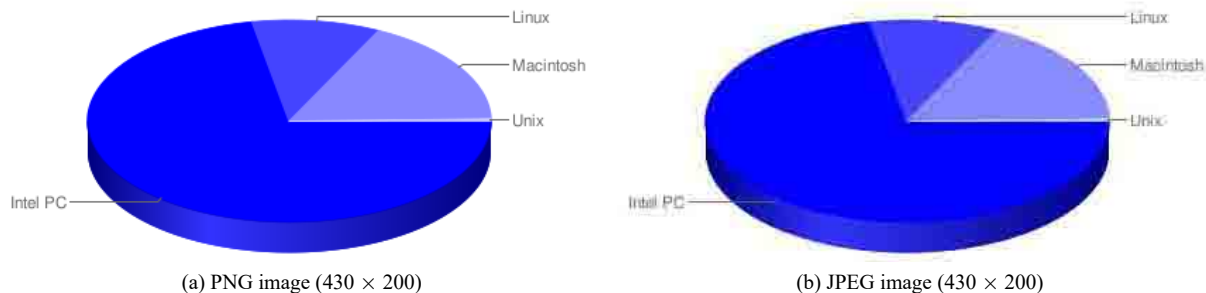


Figure 10: These examples are the circular charts showing the shares of PC's OSs used to write the papers for IPAC10. (Publishing approved by JACoW)

定している。

- Figure の Caption には文末にピリオドが必要。
- Figure 9 の例では、PDF を幅 55 mm に貼り込んでいる。この例では、`\begin{figure}` の位置指定オプションに `hbt` を付け、「その位置」への挿入を優先するよう指定している。
- Figure 10 の例では、`subfloat` を定義して図を二枚並べている。図の位置は `tbp` として上か下、あるいは次のページを指定している。
- Figure 10 の例では、PNG と JPEG ファイルを各幅 80 mm に貼り込んでいる。
- 横二段に渡る図を入れる場合は、`\begin{figure*}` および `\end{figure*}` のように `figure` の次に `*` を付けて指定する。表についても同様に `\begin{table*}` および `\end{table*}` とする。ただし、1 ページ目に横二段の図表を挿入することは出来ないので注意。
- Figure の Caption や Table の Title 配置は、それが 1 行に収まる場合はセンタリング、2 行以上は両端揃えに。尚、本 `TeXtemplate2022.tex` ファイルプリアンブル中の `\abovecaptionskip` 及び `\belowcaptionskip` で、図キャプション表タイトルの上下それぞれに 3 pt の空間を設定している。

7.8 図作成における注意

- 図のフォーマットはビットマップが一番確実で、以下のように選ぶと、美しさとサイズのバランスが最適。
写真：JPEG
CAD 図・グラフ等：PNG (TIFF も可)
- PNG は GIF を拡張した優れたビットマップフォーマットで、線画等を劣化無くコンパクトに圧縮できるため、強く推奨する。Figure 10 は、円グラフを PNG と JPEG に変換した例で、いずれも約 12 kB のサイズであるが、JPEG では画質が大きく低下していることがわかる。
- 写真やグラフは、そのファイルサイズが大き過ぎると表示に時間がかかってしまうので、なるべく小さなファイルとなるようにすること。特に EPS や WMF / EMF は、作り方によってはとても大きくなることがあるので注意が必要。

- 論文を原寸で印刷する場合、PNG や JPEG の図の分解能は、特に文字が小さくない限り最低 300 dpi 有ればよく、この場合一段分の幅は約 1000 ドットに相当する。
- 多数の点をプロットしたグラフをメタファイルとして貼り付けると、論文のデータサイズが大きくなり過ぎるため、データを間引くか上記のように PNG 等のビットマップに変換する等して、データサイズを小さくすること。
- 図表はカラーでも良いが、モノクロプリンタで印刷する場合でも読者に理解できるよう、配色に注意する。
- 図中も原則として所定のフォントを使用する。

7.9 数式の挿入

数式は、`TeX` のコマンドを使って作成し、必要なら数式番号を (6) のように振ってください。

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (6)$$

7.10 図と表の参照

本文中で図や表を参照するときには、Table の場合は全て Table 4 (数字の前に半角スペースを入れる) などとし、一方図の場合には、文頭にあるときは Figure 9 (数字の前に半角スペースを入れる) のように略さず記し、文中では Fig. 9 (数字の前に半角スペースを入れる) のように略記してください。

7.11 数式の参照

本文中で数式を参照するときには、文頭では Equation (1) (左カッコの前に半角スペースを入れる)、文中では Eq. (1) (左カッコの前に半角スペースを入れる) のように略記してください。

7.12 文献・URL の参照

記事に関連する説明等を補足するために文献及び URL を参照する事をおすすめします。本文中で参照する文献及び URL には、文中で初めて引用される順に通し番号を振り、`\cite{}` を使用してください。

同じ位置で複数の文献を参照するときには、`[?, ?]`、`[?, ?, ?]`、`[?, ?, ?, ?]`、`[?, ?, ?, ?, 6]`、`[?, ?, ?, ?, 6, 7]` のように

記述することを推奨します。

7.13 参考文献リスト

インデントを揃えるために、参考文献の数が9編以下ならば `\begin{thebibliography}{9}` を、10編以上ならば `\begin{thebibliography}{99}` を選択してください。

参考文献は、9 pt の明朝系（英文の場合は Times 系）で記載してください。

文献のみの記述の場合 [?], 最後はピリオド「.」で終わります。

文献が既に電子出版されている場合 [6, 10–12], URL (や DOI) を併記してください。その場合、参考文献記述の最後はセミコロン「;」とし、その後 `\url{}` を使用して URL を続けて記述してください。URL 記述の最後にはピリオド等を入れないでください。

URL のみ記述の場合 [?], 最後にはピリオド等を入れないでください。

URL が長過ぎて1行に収まらない時は、途中でスペースを入れるなど2行にわたるようにしてください。

7.14 脚注の挿入

脚注を挿入する場合は、`\footnote{}` を使用してください。本文中に挿入すれば¹、自動的に番号が振られ、段ごとにまとめてページ最下段に配置されます。

7.15 自動翻訳利用の際の注意

要旨や図の日本語説明文をウェブサイトの自動翻訳を利用して英文に変換する場合、いくつか注意をすることでかなり英文を理解しやすくなります。その注意を以下に列挙します。

1. 技術論文の場合、一般的なサイトの中では Google や Excite の英訳が比較的良好な結果を与えるようである。
2. 自動翻訳システムが誤解なく理解しやすい文を入力すること。そのような文を書くに当たっての注意は以下の通り。尚、一般にそのような文は、我々から見ればくどくて不自然である。
 - 一つの文は出来るだけ短くする。
 - 主語を省略せず明確にする。
 - 省略した表現や名称を使わない。
 - 専門用語等は初めから英語にしておく。
 - 名詞を他の名詞の形容詞として使う場合、語順や名詞間にいれる「の」等の言葉により翻訳結果はかなり異なる場合がある。
 - くどくても、未来や過去など時制が明解な表現とする。
3. いかにか上記の注意を払っても、不自然あるいは不正確な英訳をなくすことは出来ない。むしろ、著者が上記の観点からすぐに不適切と分かる日本語をまず修正してから自動翻訳し、その後英訳を修正する方が早い。

4. 特に日本語にはない冠詞や複数形は自動翻訳では不正確なので、著者が修正する必要がある。

このテンプレートの Abstract は、以下の文章を Google の翻訳ページで英語に変換したものです。日本語の表現を若干工夫して、なるべく理解できる英語になるようにしてありますが、翻訳された英語は一切修正していません。

【Abstract 翻訳元の日本語要旨】

本テンプレートは論文を日本語で記述するために用意されました。英語論文執筆には JACoW のテンプレートをお使いください。あなたがこの .tex ファイルに直接 texts を書き込めば、 \TeX で論文を容易に完成させることができます。完成した論文を PDF に変換する際は、必ず全てのフォントを埋め込んでください。論文のページ数は、2-5 ページでなければならない。PASJ2022 の論文スタイルが次のように変更されましたので、ご注意ください。1) タイトルおよび著者名は日本語と英語で書くこと。2) Figures and tables とそれらの captions は英語で記述すること。翻訳ソフトを使用して英語の要旨や figure captions を作成する場合は、以下の本文中の注意事項を参考にしてください。

8. 原稿の仕上げと投稿

8.1 チェック項目

- 代表者メールアドレスが正しく脚注にあるか。
- ページ番号やヘッダー、フッターを入れない。
- 図のキャプション、テーブルのタイトルの記述。
 - 1行のみでは中央寄せとし、複数行では段幅一杯に合わせる
 - テーブルタイトルは頭文字を大文字とし、文末のピリオドなし（3行以上の長文は通常文章スタイルも可）
 - 図のキャプションは通常の文章スタイルでピリオド付き
- 章や図表を参照する番号は正しいか。
- 参考文献番号は正しいか。
- シンボルがアルファベットに化けていないか。
- 原稿のデータサイズが大き過ぎないか。（目安として 10 MB 以下）

8.2 PDF ファイルの作成

PDF ファイルの作成は \TeX アプリケーションから直接行って下さい。PDF はバージョン 1.4 で作成してください。Mac 及び Windows の OS を使用されている方は、TeX Live [13, 14] の使用をおすすめします。また、Cloud LaTeX [15] や Overleaf [16] といったウェブサービスも容易に利用ができ、無償での利用も可能です。テンプレートは2種類 (TeXtemplate2022_LuaTeX.tex 及び TeXtemplate2022_upTeX.tex) あり、クラスファイルも2種類 (PASJ2020_LuaTeX.cls 及び PASJ2020_upTeX.cls) あります。

¹ 脚注は `\footnote{}` を使用して記入。

8.2.1 MacOS 且つ LuaTeX の場合 TeXShop→環境設定 → 書類 → 設定プロファイル →up-TeX(ptex2pdf) を選び、タイプセット →pdfTeX を選んで下さい。

8.2.2 MacOS 且つ upTeX の場合 TeXShop→環境設定 → 書類 → 設定プロファイル →up-TeX(ptex2pdf) を選び、タイプセット →TeX + DVI を選んで下さい。

8.2.3 WindowsOS 且つ LuaTeX の場合 TeXworks→タイプセット →LuaLaTeX を選んで下さい。

8.2.4 WindowsOS 且つ upTeX の場合 TeXworks→タイプセット →upLaTeX を選んで下さい。

8.2.5 Cloud LaTeX 且つ upTeX の場合 Project Settings で、LaTeX Engine として、upLaTeX を選んで下さい。

8.2.6 Overleaf 且つ upTeX の場合 Menu で、Compiler として、LaTeX を選び、参考情報 [17] に従い latexmkrc という設定ファイルを作成して下さい。

8.2.7 Overleaf または Cloud LaTeX 且つ LuaTeX の場合 Menu または Project Settings で、Compiler または LaTeX Engine として、LuaLaTeX を選んで下さい。

PDF 変換の際は、必ず全てのフォントを埋め込むように変換してください。こうすることで、どの PC の上でも著者の意図した通りの原稿を再現することが出来ます。PDF ファイルにフォントが埋め込まれているかどうかは、Adobe Acrobat Reader DC などで文書のプロパティを見れば確認できます。

8.3 投稿

原稿の TeX ファイル、図のファイル及び完成した PDF ファイルを、定められた期日までに年会ホームページからアップロードしてください。

謝辞

謝辞の見出しには章番号を振らないため、謝辞を入れる場合は、`\acknow{謝辞}`と書き込み、謝辞の文

章を続けて下さい。

参考文献

- [1] H. W. Koay, M. Fukuda, H. Kanda and T. Yorita, Results in Physics, **33**, 105090(2002)
- [2] National High Magnetic Field Laboratory. *Engineering Critical Current Density vs. Applied Field for Superconductors Available in Long Lengths*. 2018. URL:<https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots/critical-current>
- [3] M.A. Liberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley Interscience, 2005).
- [4] G. Browb (Editor) *The physics and Techonology of Ion Sources* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004)
- [5] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR plasma*. (Institute of Physics Publishing, 1996).
- [6] R. Hajima, “Emittance Compensation in an ERL Merger”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 2004, pp. 432-434; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_lam29/proceedings.html
- [7] <http://www.mimikaki.net/>
- [8] Electronic Processing of Submissions; <http://www.jacow.org/index.php?n=Authors.HomePage>
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Capitalization>
- [10] A. Alpha and B. T. Beta, “Novel techniques for future TeV electron accelerators”, in *Proc. IPAC’18*, Vancouver, BC, Canada, Apr.-May 2018, pp. 567-569. doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-PAPERID
- [11] P. Venus *et al.*, “New techniques in laser wakefield accelerators”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 18, p. 120198, 2015. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.18.120198
- [12] T. Earth *et al.*, “Low dose irradiation impact on modern silicon detectors”, *Nucl. Instr. Meth.*, vol. 692, pp. 256–280, 2014. doi:10.1016/j.nima.2014.11.022
- [13] <https://tug.org/mactex/>
- [14] <https://www.tug.org/texlive/acquire-netinstall.html>
- [15] <https://cloudlatex.io/>
- [16] <https://overleaf.com/>
- [17] <http://doratex.hatenablog.jp/entry/20180503/1525338512>