

博士学位論文 研究紹介「大気圧ミリ波放電時のプラズマ・衝撃波伝播構造制御とそのマイクロ波ロケットへの応用」

マイクロ波ロケットの推進性能

山口 敏和¹⁾

要 旨

近年、宇宙利用を目的とした宇宙開発が盛んに行われているが、打ち上げロケットに代表される輸送コストは劇的な低減を見せていない。本稿では、次世代の打ち上げシステムとして期待されるマイクロ波ロケットの概要について紹介するとともに、繰り返しパルス実証実験の結果および推進性能について示した。

キーワード：宇宙輸送コスト、マス・ドライバ、マイクロ波ロケット、ミリ波放電、ジャイロトロン、推力計測

1. はじめに

1.1 ビーミング推進

宇宙への大量物資輸送が必要となる時代を目前に、地上から宇宙への輸送コストの大幅低減は宇宙開発における最重要課題の一つである。物資輸送に特化するマス・ドライバという考え方では、高価な再使用部分と安価な使い捨て部分とで構成されるシステムが有望視される。図1に打ち上げコストの概念図を示した。既存のロケットでは、使い捨て部分のコストが大きな割合を占めるため、打ち上げ回数に応じて総額が増える。再使用ロケットでは、再使用部分の割合が上がる一方で使い捨て部分のコストが低減され、打ち上げ回数が増えても総額へのインパクトは小さくなる。これに対して、ビーミング推進機では、再使用部分である地上設備がコストの大半を占め、使い捨てる機体にはエネルギー源を積まないために機体製造費を低減させることができる。また、再使用ロケットでは宇宙から帰還した機体をメンテナンスする必要があるが、ビーミング推進機では再使用部分が全て地上にあるためメンテナンスにかかるコストを低減することができる。

図2に示したようにビーミング推進は電磁波ビームのエネルギーを推力へと変換する推進機であり、機体外部からのエネルギー供給により飛行する。化学燃焼によるロケットエンジンで推力を調節するには燃焼の開始・終了を繰り返す必要があるが、ビーミング推進では電気的な制御が可能となる。これは、ガソリン車と電気自動車でのアクセル制御の違いと似ている。

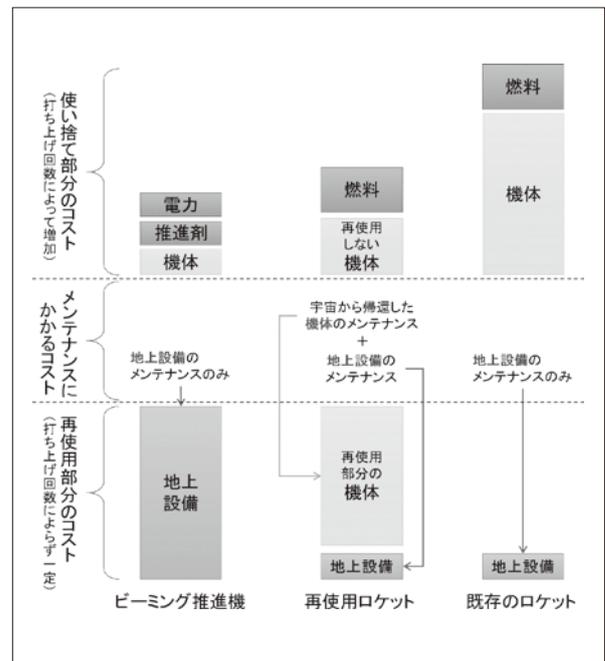


図1 打ち上げコストの概念図

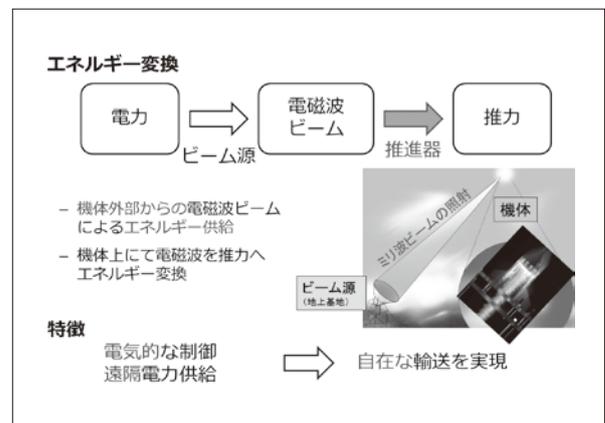


図2 ビーミング推進のコンセプト

1) 江戸川大学 情報文化学科専任講師
宇宙工学・情報教育

1.2 マイクロ波ロケット

ビーミング推進は使用するビーム源や推力生成過程の違いから図3のように分類され、繰り返しパルス発振のミリ波をビーム源に使い、デトネーション方式を採用するものを「マイクロ波ロケット」と呼ぶ。すなわちマイクロ波ロケットは、周辺大気を推進剤として吸い込み、地上からミリ波ビームによって供給されたエネルギーを用いて推進器内で放電を誘起し、デトネーション現象により生成した高圧ジェットを吹き出すことで推進力を得る。電力をミリ波へと変換し、導波管

から照射されるミリ波ビームを伝送鏡によって適切なビーム径へと変換し、推進機に向けて照射する(図4)。ミリ波ビームは繰り返しパルスで照射され、推進機はミリ波ビームを集光し放電させる。高価な再使用部分はメンテナンス容易な地上設備であるビーム源に限られ、機体内部にエネルギー源を積まないことおよびデトネーション現象による昇圧を用いることにより、使い捨て部分である機体重量を大幅に簡素軽量化して安価にすることができる。また、ビームに用いるミリ波は、大電力ビーム発振技術がジャイロトロン(図5)により既に開発されている点で実現性が高い。

	赤外線レーザー	ミリ波 (マイクロ波)
加熱方式	CW: レーザー支持プラズマ	CW: マイクロ波加熱ロケット
アブレーション方式	RP: レーザーアブレーション	
デトネーション(爆轟)方式	RP: レーザーデトネーション	RP: マイクロ波ロケット

CW: 連続発振, RP: 繰り返しパルス発振

・ 超低コスト実現のための三要素

- 大気中ではエアブリージング(大気吸込み式) → 必要な推進剤が飛躍的に少ない → 高いペイロード比
- パルスデトネーション作動 → ターボポンプ不要 → 簡素な機体構造 → 簡素な機体の使い捨て
- 地上に高価なビーム源を設置 → 高価なビーム源は・繰り返し使用可能・メンテナンスが容易 → 打ち上げ回数によるコストへの償還

図3 デトネーション方式の優位性

大電力ミリ波発振器「ジャイロトロン」

ITER(国際熱核融合実験炉)のプラズマ加熱・電流駆動用に開発
 日本原子力研究開発機構(現 量子科学研究所発振機構)と東芝電子管デバイス(現 キヤノン電子管デバイス)による共同開発

主要諸元	
発振周波数	170 GHz
出力パワー	< 1 MW
出力ビームプロファイル	Gaussian
ビームウエスト直径	40 mm
電力効率	60%

高さ: 3 m / 重量: 800 kg

出力波形

利点

- MW級の発振出力を達成済み
- 同パワーレベルのレーザーに比べ安価
- パルス中の出力波形が一定
- 発振時間を制御可能(0.1 msec - 1,000 sec)
- 5 kHzまでの繰り返し発振を制御可能

図5 大電力ミリ波発振器ジャイロトロン

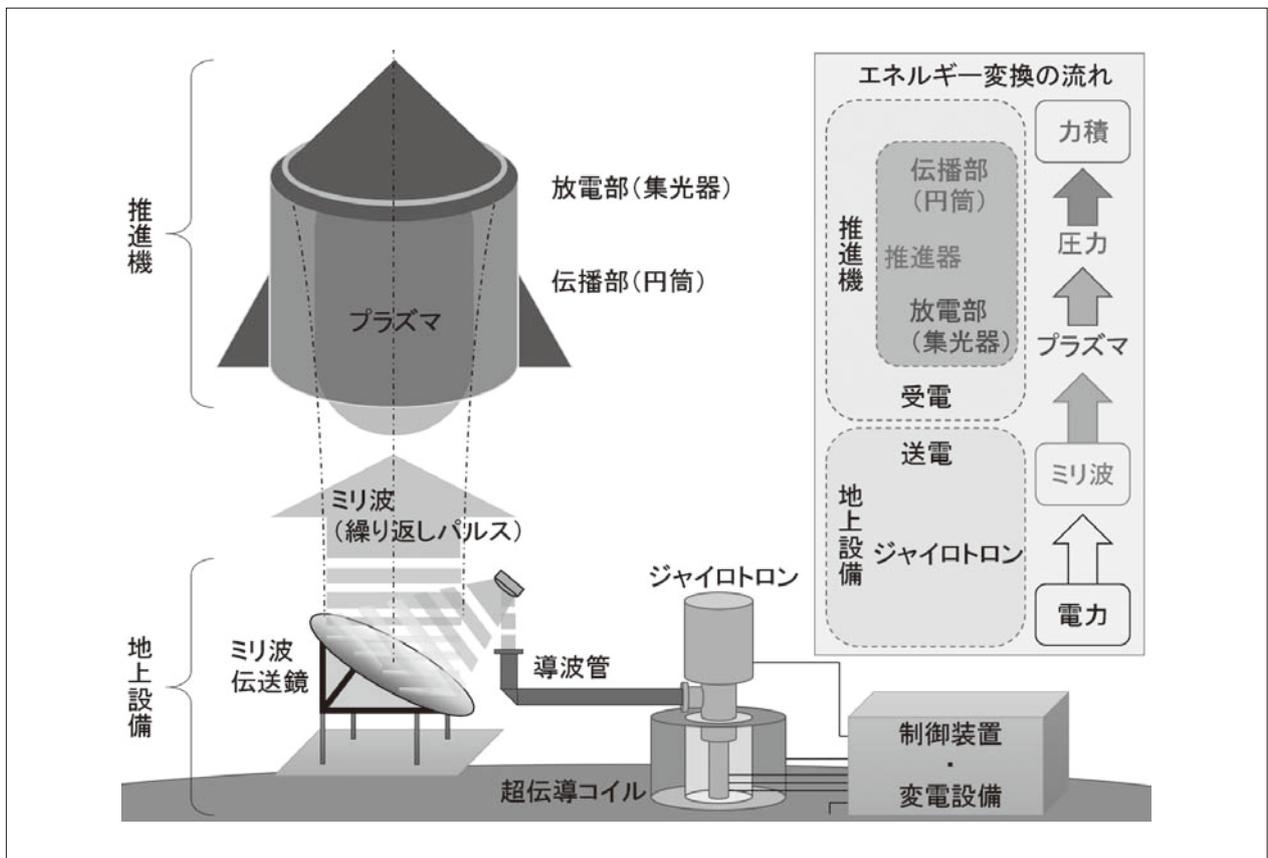


図4 マイクロ波ロケットのシステム構成

1.3 作動原理と推進性能

図6にマイクロ波ロケットの作動原理を示した。放電により生じたプラズマがビーム電力を吸収しながらビーム照射方向に遡上するように進む。円筒内を伝播する衝撃波をプラズマが背後から駆動し、推進器内部の高圧気体を排気することで力積を得る。このサイクルを繰り返すことで定常的な推力を得る。図7に1サイクルで照射されるエネルギー E と生成される力積 I との関係的模式的に示した。図中の番号は図6の番号と対応している。1サイクル中の(2)から(3)にかけて推進器内に維持される圧力を p_1 、その維持時間を $t_{plateau}$ 、周辺圧力を p_0 、照射ビーム電力を P_{top} 、1パルスの照射時間を τ 、パルス繰り返し周波数を f とした。プラトー圧 $p_{plateau}$ を p_1 と p_0 との差圧であるゲージ圧とする。

$$p_{plateau} = p_1 - p_0$$

推進器断面積を A とすると、1サイクルで得られる力積は $A \cdot p_{plateau}$ および $t_{plateau}$ の積で表される。マイクロ波ロケットの単パルスでの推進性能を表す指標には、運動量結合係数 C_m を用いる。これは、発生力積 I を照射

エネルギー E で除したものであり、繰り返しパルス作動では推力電力比に等しい。デューティ比を ϕ_{duty} 、時間平均推力を F 、1サイクルで時間平均した照射電力を P_{ave} とすると、次式で表される。

$$C_m = \frac{I}{E} = \frac{A \cdot (p_1 - p_0) \cdot t_{plateau}}{P_{top} \cdot \tau} = \frac{I \cdot f}{P_{top} \cdot \phi_{duty}} = \frac{F}{P_{ave}}$$

2. 繰り返しパルス作動実証実験

マイクロ波ロケットの性能を飛行実証により確認するため、繰り返しパルス作動による垂直打ち上げ実験を行った(図8)。100g級のモデルロケットに対して、発振周波数170GHzのミリ波ビームをピーク電力600kW、繰り返し周波数100Hzで照射し、1.2mの飛翔を確認した。このとき、平均照射電力75kWにおいて2Nを記録し、推力電力比は27N/MWであった。しかし、ビーム照射窓から2m以上離れた位置では重量を上回る推力が生成されなかった。これは、回折効果によりミリ波ビームが伝送距離に応じて拡散され、推進器内部に十分な電力密度を持ったビームが照射されないためと考

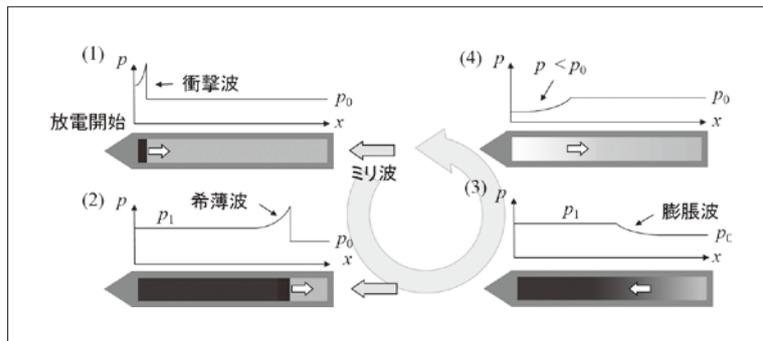


図6 マイクロ波ロケットの作動原理

- (1) 放電開始：ミリ波ビームが推進器底部の開口端から導入され、推進器頭頂部内側の集光器において放電を開始
- (2) 爆風波伝播：衝撃波が背後に希薄波をとめない開口端へ伝播
- (3) 膨張波伝播：開口端から衝撃波を排出後、開口端から頭頂部へ膨張波が伝播
- (4) 自然吸排気：膨張波が頭頂部で跳ね返り、再び開口端へと伝播

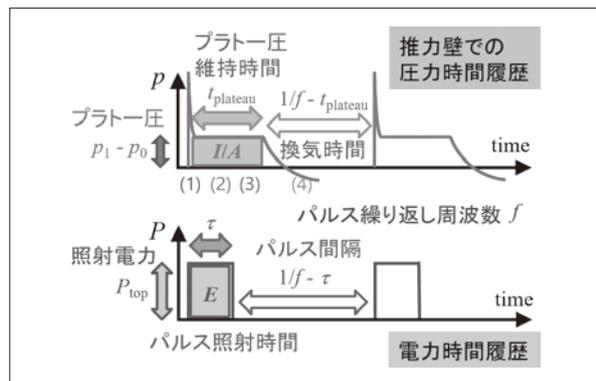


図7 1サイクルでの発生力積と照射エネルギーの関係

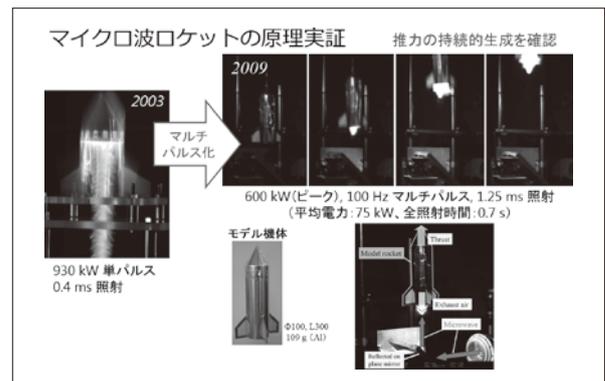


図8 繰り返しパルス作動による実証実験

えられる。

そこで、ミリ波ビームを数メートル離れた位置へ空間伝送した上での推力生成を確認するため、長距離ミリ波ビーム伝送系を設計し、ガイドワイヤによる水平走行実験を行った(図9)。回折効果によるビーム拡散を抑制し、伝送距離1~5mにおいて2Nの推力を定常的に得られることを確認した。

さらに、推力スタンド(図10)を用いて繰り返しパルス作動での時間平均推力を計測した。推進器をナイフエッジに乗せて吊り下げ剛体振り子とみなし、レーザー変位計により振り子の変位を計測することで推力を見積もった。図11に示した結果から、パルス繰り返し周波数を上げることで推進性能は向上し、ピーク電力570kW、パルス繰り返し周波数200Hzのビームを3パルス照射したとき、平均推力30N、推力電力比330N/MWを計測した。

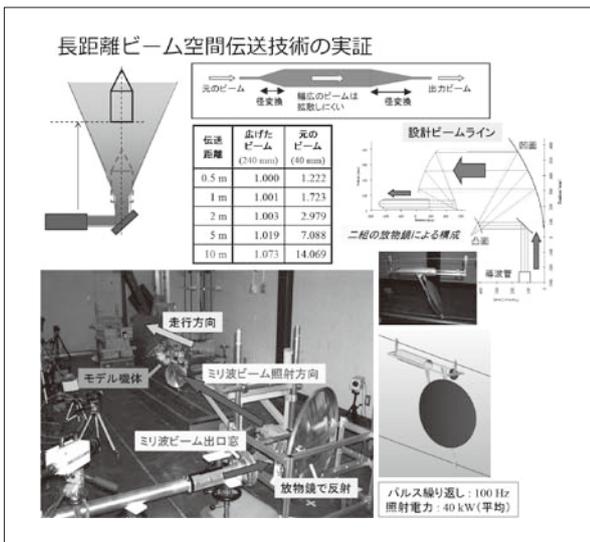


図9 距離ビーム伝送実証実験

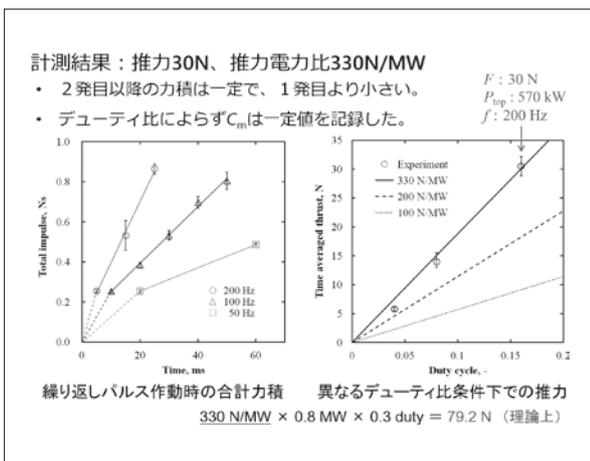


図11 推力計測結果

3. 推進器内の伝播構造

力積を増やすにはプラトー圧を高める必要がある。プラトー圧は、衝撃波とプラズマ領域が推進器内を伝播する際の構造によって変化すると考えられる。図12に推進器内部を伝播する衝撃波とプラズマの伝播構造を模式的に示した。垂直衝撃波の伝播速度は衝撃波前後の圧力に依存し、衝撃波背後に熱源があることで衝撃波背後の圧力が高く維持され、衝撃波の伝播速度が上昇する。一方、プラズマの伝播速度は照射ビームのピーク電力密度に依存し、照射ビーム電力が高いほど伝播速度が上昇する。プラトー圧を高めるためには、衝撃波背後の領域をミリ波エネルギーを吸収したプラズマが加熱することが必要であり、衝撃波とプラズマが一体となって伝播するデトネーション的構造を維持する高い電力密度のビーム照射が必要となる。

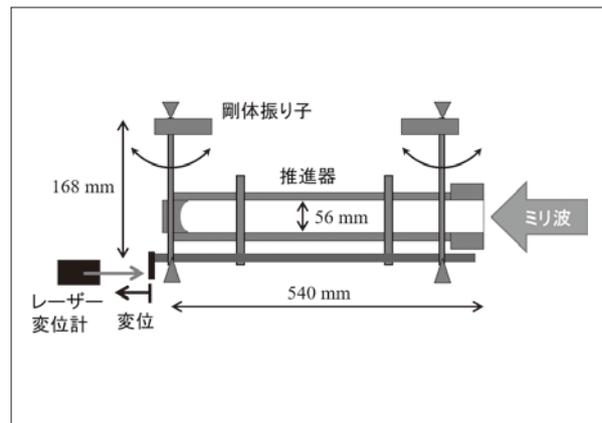


図10 推力スタンドの模式図

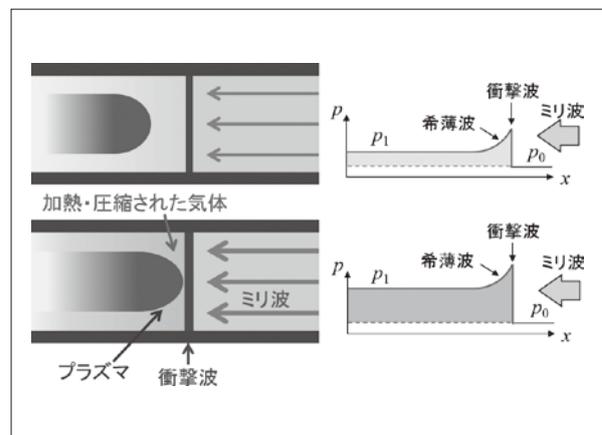


図12 照射電力密度の違いによる推進器内部の伝播構造変化

左上：衝撃波とプラズマ領域とが分離して伝播する構造
 左下：衝撃波とプラズマ領域とがともに伝播するデトネーション的構造
 右上：分離伝播構造での円筒内圧力分布
 右下：デトネーション伝播構造での円筒内圧力分布

4. まとめ

図13に設定パラメータと推進性能の入出力関係を整理した。推進器の設定として推進器断面積 A および推進器長 L を決め、ジャイロトロン運転パラメータ($P_{initial}, \tau, f$)を設定し、伝送アンテナの直径を決めることで、単パルス作動時の力積 I および運動量結合係数 C_m 、

繰り返しパルス作動時の推力 F および推力電力比 C_{m_tpr} が決定される。ビーム電力密度 S_0 とプラトー圧 $p_{plateau}$ および伝播速度 U_{ioniz}, U_{shock} の関係性が推進性能を議論する上で核となる。

図14に今後の開発ロードマップおよび必要となる要素研究を示した。ミリ波ビームや推進器に関する要素技術を確立し、飛行環境に対応した最適な機体を開発する必要がある。

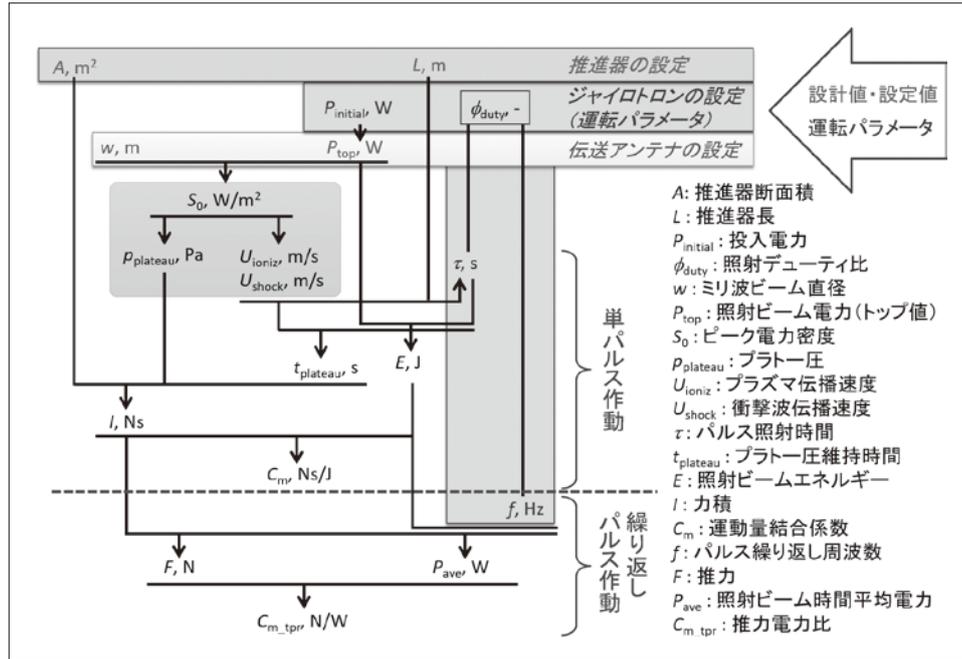


図13 設定パラメータと推進性能の入出力関係

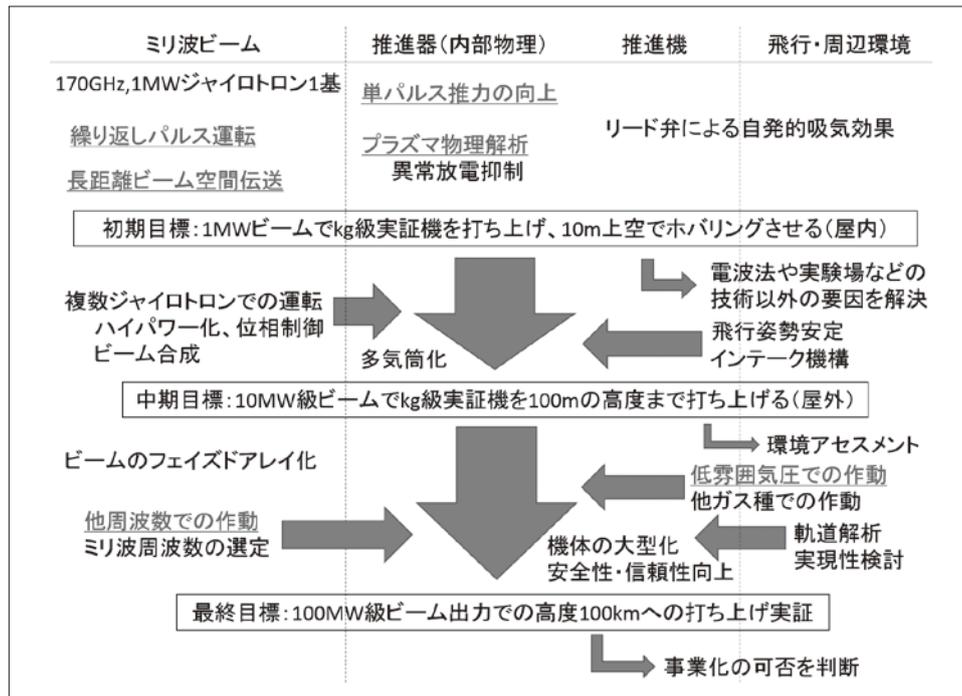


図14 開発ロードマップと必要となる要素研究

参考文献

- 小紫公也, 嶋村耕平, 福成雅史, 小田靖久, 今井剛, 高橋聖幸, 葛山浩, 大西直文, “ミリ波ビームが飛ばす“マイクロ波ロケット””, プラズマ・核融合学会誌, 93, 10 (2017), pp.465-490.
- Takahashi, M., Komurasaki, K., “Discharge from a high-intensity millimeter wave beam and its application to propulsion”, Advances in Physics: X, 3, 1 (2018), pp.113-144.
- 山口敏和, “大気圧ミリ波放電時のプラズマ・衝撃波伝播構造制御とそのマイクロ波ロケットへの応用”, 博士学位論文, 茨城大学, (2019).