深層強化学習による高周波加速電圧パターン生成の試み

RCS 電圧パターンを題材に

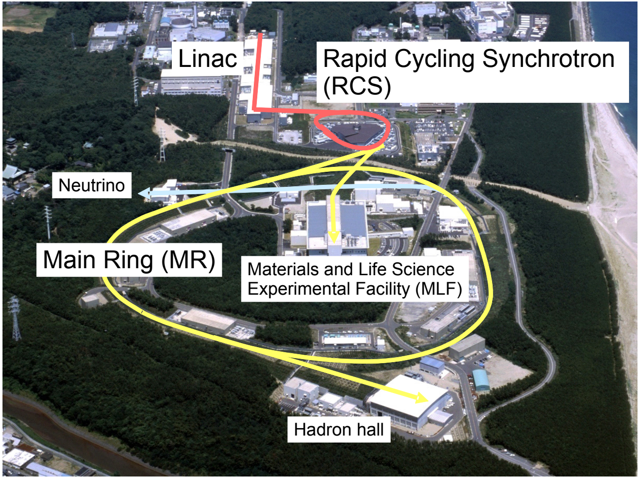
田村文彦

J-PARC センター、日本原子力研究開発機構

2025 年 12 月

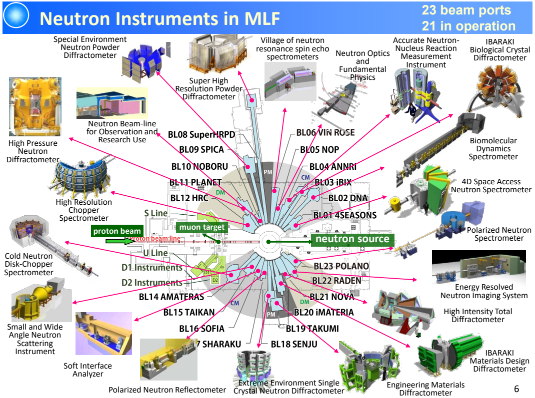
Contents

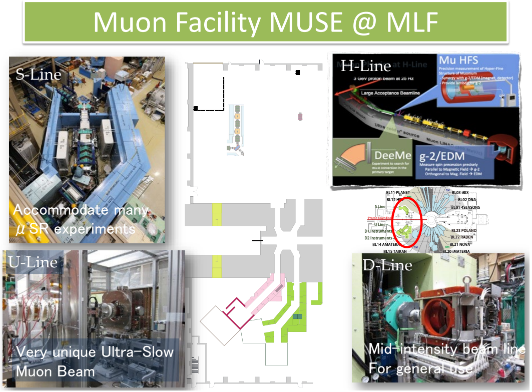
大強度陽子加速器施設 (J-PARC)



- 3 つの加速器 (400 MeV linac、3 GeV RCS、30 GeV Main Ring) と 3 つの実験施設 (物質生命科学実験施設 (MLF)、ハドロン、ニュートリノ)。大強度ビームで大量の二次粒子を発生
- RCS ビームは MR と MLF に導かれる

物質生命科学実験施設: MLF

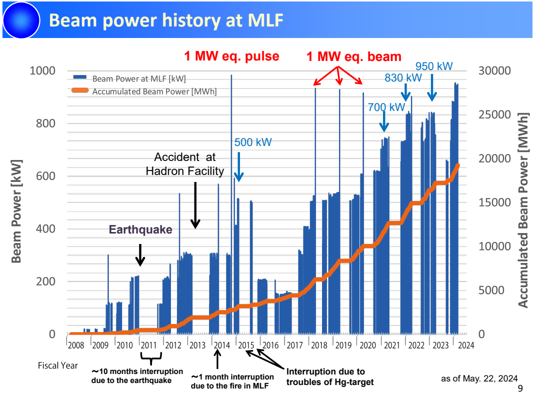


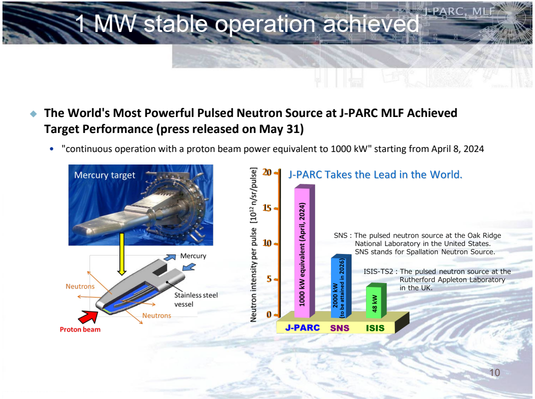


MLF には、核破砕中性子とミュオン源が設置されている。

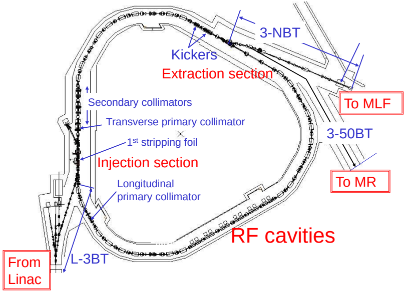
- 中性子: 20 以上のビームライン
- ミュオン: 4 つ

RCS は 2024 年に 1 MW ビームの安定供給を達成





Rapid Cycling Synchrotron (RCS)



circumference	348.333 m
energy	0.400–3 GeV
beam intensity	8.3×10^{13} ppp
output beam power	1 MW
accelerating frequency	1.227–1.671 MHz
harmonic number	2
maximum rf voltage	440 kV
repetition rate	25 Hz
No. of cavities	12
Q-value of rf cavity	2

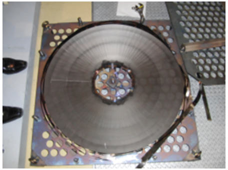
2 つの重要な要素:

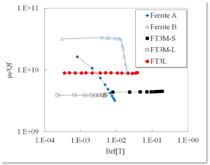
High γ_t ラティス

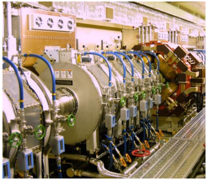
- 加速中、縦方向ロスの原因となる γ_t トランジションがない
- スリッページファクタが小さくシンクロトロン振動が遅い

金属磁性体 (Magnetic Alloy、MA) 空胴の採用

- フェライト空胴の 2 倍電圧が出る
- 広帯域 ($Q = 2$)、無同調で加速周波数変化に対応
- 2 倍高調波重畳が可能

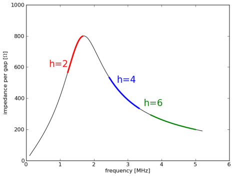




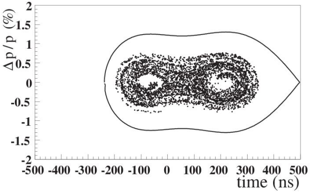


広帯域空胴の利点

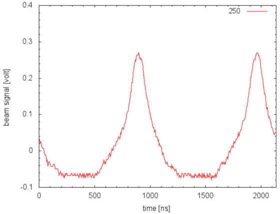
$Q = 2$ response:



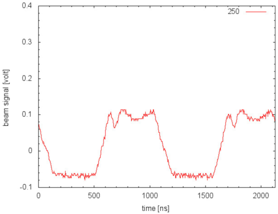
Simulated distribution:



Single harmonic:

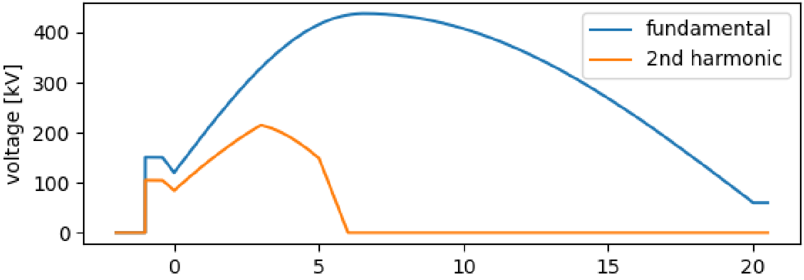


Dual harmonic:



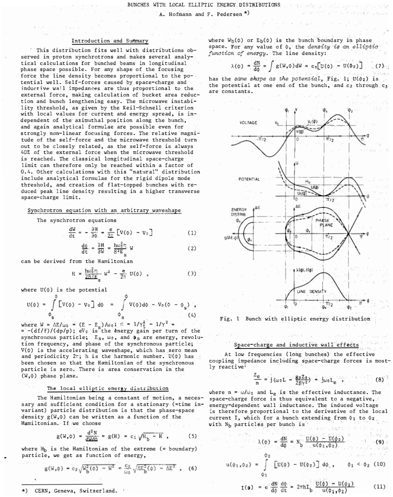
空胴に基本波と 2 倍高調波を重畳した電圧を発生させるデュアルハーモニック運転でバンチ整形を行い、空間電荷効果を緩和できる。

- 大強度ビーム加速に必須



如何にしてこのような電圧パターンを得ることができるのだろうか。

基本波のみの場合



BUNCHES WITH LOCAL ELLIPTIC ENERGY DISTRIBUTIONS

A. Hofmann and F. Pedersen *)

Introduction and Summary

This distribution fits well with distributions observed in proton synchrotrons and makes several analytical calculations for bunched beams in longitudinal phase space possible. For any shape of the focusing force the line density becomes proportional to the potential well. Self-forces caused by space-charge and inductive wall impedances are thus proportional to the external force, making calculation of bucket area reduction and bunch lengthening easy. The microwave instability threshold, as given by the Keil-Schnell criterion with local values for current and energy spread, is independent of the azimuthal position along the bunch, and again analytical formulae are possible even for strongly non-linear focusing forces. The relative magnitude of the self-force and the microwave threshold turn out to be closely related, as the self-force is always 40% of the external force when the microwave threshold is reached. The classical longitudinal space-charge limit can therefore only be reached within a factor of 0.4. Other calculations with this "natural" distribution include analytical formulae for the rigid dipole mode threshold, and creation of flat-topped bunches with reduced peak line density resulting in a higher transverse space-charge limit.

Synchrotron equation with an arbitrary waveshape

The synchrotron equations

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \phi} = \frac{e}{2\pi}\left[V(\phi) - V_0\right] \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial H}{\partial W} = \frac{h\omega_0^2\eta}{\beta^2 E_s} W \quad (2)$$

can be derived from the Hamiltonian

$$H = \frac{h\omega_0^2\eta}{2\beta^2 E_s} W^2 - \frac{e}{2\pi} U(\phi) , \quad (3)$$

where $U(\phi)$ is the potential

$$U(\phi) = \int_{\phi_s}^{\phi}\left[V(\phi) - V_0\right] d\phi = \int_{\phi_s}^{\phi} V(\phi)d\phi - V_0(\phi - \phi_s) , \quad (4)$$

where $W = \Delta E/\omega_0 = (E - E_s)/\omega_0$; $\eta = 1/\gamma_t^2 - 1/\gamma^2 = -(df/f)/(dp/p)$; eV_0 is the energy gain per turn of the synchronous particle; E_s, ω_0, and ϕ_s are energy, revolution frequency, and phase of the synchronous particle; $V(\phi)$ is the accelerating waveshape, which has zero mean and periodicity 2π; h is the harmonic number. $U(\phi)$ has been chosen so that the Hamiltonian of the synchronous particle is zero. There is area conservation in the (W,ϕ) phase plane.

The local elliptic energy distribution

The Hamiltonian being a constant of motion, a necessary and sufficient condition for a stationary (=time invariant) particle distribution is that the phase-space density $g(W,\phi)$ can be written as a function of the Hamiltonian. If we choose

$$g(W,\phi) = \frac{d^2N}{dWd\phi} = g(H) = c_1\sqrt{H_b - H} , \quad (5)$$

where H_b is the Hamiltonian of the extreme (= boundary) particle, we get as function of energy,

$$g(W,\phi) = c_2\sqrt{W_b^2(\phi) - W^2} = \frac{c_2}{\omega_0}\sqrt{\Delta E_b^2(\phi) - \Delta E^2} , \quad (6)$$

where $W_b(\phi)$ or $E_b(\phi)$ is the bunch boundary in phase space. For any value of ϕ, the *density is an elliptic function of energy*. The line density:

$$\lambda(\phi) = \frac{dN}{d\phi} = \int g(W,\phi)dW = c_3\left[U(\phi) - U(\phi_2)\right] \quad (7)$$

has the *same shape as the potential*, Fig. 1; $U(\phi_2)$ is the potential at one end of the bunch, and c_2 through c_3 are constants.

Fig. 1 Bunch with elliptic energy distribution

Space-charge and inductive wall effects

At low frequencies (long bunches) the effective coupling impedance including space-charge forces is mostly reactive[1]

$$\frac{Z_e}{n} = j\left(\omega_0 L - \frac{g_0 Z_0}{2\beta\gamma^2}\right) = j\omega_0 L_e , \quad (8)$$

where $n = \omega/\omega_0$ and L_e is the effective inductance. The space-charge force is thus equivalent to a negative, energy-dependent wall inductance. The induced voltage is therefore proportional to the derivative of the local current I, which for a bunch extending from ϕ_1 to ϕ_2 with N_b particles per bunch is

$$\lambda(\phi) = \frac{dN}{d\phi} = N_b\frac{U(\phi) - U(\phi_2)}{u(\phi_1,\phi_2)} \quad (9)$$

$$u(\phi_1,\phi_2) = \int_{\phi_1}^{\phi_2}\left[U(\phi) - U(\phi_2)\right] d\phi , \quad \phi_1 < \phi_2 \quad (10)$$

$$I(\phi) = e\frac{dN}{d\phi}\frac{d\phi}{dt} = 2\pi h I_b\frac{U(\phi) - U(\phi_2)}{u(\phi_1,\phi_2)} \quad (11)$$

*) CERN, Geneva, Switzerland.

基本波のみの場合は、陽子の位相空間分布が Hofmann-Pederesen 分布に従うとして、縦方向エミッタンスとモーメンタムフィリングファクターをパラメータとして加速中各時間の最適な電圧が解析的な式で計算できる。

- 超古い RAMA というコードが知られている
- 古いと言っても空間電荷による電圧減少まで考慮した優れ物

J-PARC Technical Design Report より

JAERI-Tech 2003-044

3 GeV RF Pattern

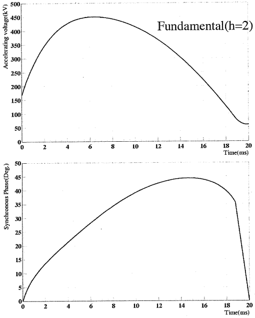


Figure 2.2.4.1: RCS rf voltage and synchronous phase pattern.

— 126 —

JAERI-Tech 2003-044

Table 2.2.4.2: RCS parameters calculated by RAMA.

Time	T	B	F_{rf}	V_{rf}	ϕ_s	Iac	Pow	B_f	P_f	dp/p	
(ms)	(GeV)	(T)	(MHz)	(kV)	(deg)	(Amp)	(MW)				(%)
0	0.400	0.273	1.228	168.8	0.00	12.9	0.00	0.315	0.679	0.85	
1	0.413	0.278	1.239	274.0	8.60	13.8	0.34	0.276	0.681	0.95	
2	0.451	0.293	1.270	345.3	13.56	14.5	0.69	0.255	0.682	0.98	
3	0.516	0.318	1.315	394.3	17.55	15.3	1.04	0.239	0.682	0.96	
4	0.607	0.352	1.368	425.5	21.21	16.2	1.40	0.225	0.681	0.92	
5	0.726	0.394	1.422	442.9	24.72	17.1	1.76	0.212	0.680	0.88	
6	0.870	0.443	1.472	450.0	28.09	17.9	2.08	0.200	0.678	0.83	
7	1.037	0.498	1.515	449.4	31.28	18.6	2.36	0.189	0.677	0.78	
8	1.222	0.557	1.551	442.9	34.23	19.2	2.58	0.179	0.675	0.74	
9	1.421	0.620	1.580	431.3	36.86	19.7	2.72	0.170	0.673	0.70	
10	1.629	0.684	1.602	415.0	39.14	20.1	2.80	0.162	0.671	0.66	
11	1.839	0.748	1.620	394.0	41.04	20.4	2.79	0.155	0.669	0.63	
12	2.046	0.811	1.634	368.5	42.53	20.7	2.71	0.150	0.666	0.60	
13	2.244	0.871	1.645	338.4	43.60	20.9	2.56	0.147	0.664	0.57	
14	2.428	0.926	1.653	303.9	44.21	21.0	2.34	0.145	0.661	0.55	
15	2.593	0.975	1.660	265.2	44.31	21.1	2.05	0.145	0.658	0.52	
16	2.734	1.017	1.664	222.5	43.77	21.1	1.71	0.146	0.655	0.49	
17	2.848	1.050	1.668	176.4	42.40	21.1	1.32	0.151	0.652	0.46	
18	2.932	1.075	1.670	126.8	39.67	21.0	0.90	0.160	0.647	0.43	
19	2.983	1.090	1.671	73.4	33.93	20.7	0.46	0.180	0.641	0.37	
20	3.000	1.095	1.672	60.0	0.00	20.7	0.00	0.179	0.361	0.38	

Notices:

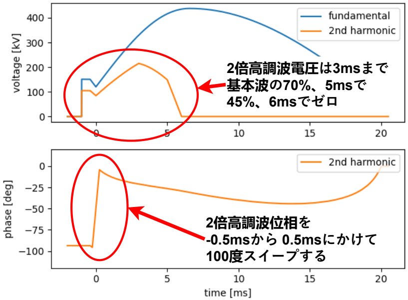
1. Hofmann-Pedersen's distribution is adopted.
2. The accelerating voltage V_{rf} includes the correction for space charge effects.
3. Longitudinal beam emittance is 3.54 eV·s and momentum filling factor without space charge effects is 0.7 except extraction.

— 127 —

- RAMA は adiabaticity には無頓着なので、この場合加速後半は使えないですが……。

2 倍高調波ありの場合

RCS の電圧パターンの例:



2 倍高調波ありの場合、解析的な式は使えないので…、

1. 基本波の電圧を RAMA 等で決める
2. 2 倍高調波の割合を設定する
3. 縦方向トラッキングシミュレーションを行い、位相空間分布やビームロス等を評価
4. パターン (2 倍高調波割合、位相) を修正し、またシミュレーションを回す

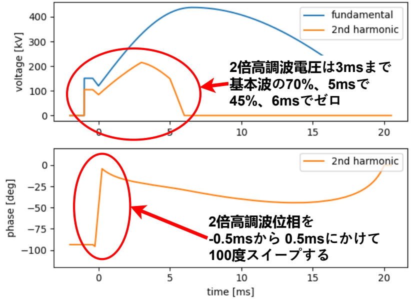
と手間と時間をかけて行っている。

より平坦なビームを生成するために 3 倍、4 倍高調波を加えるとすると、手間と時間は膨大。

深層強化学習で電圧パターンの最適化を行うことができるのではないか、と考えた。

2 倍高調波ありの場合

RCS の電圧パターンの例:



2 倍高調波ありの場合、解析的な式は使えないので…、

1. 基本波の電圧を RAMA 等で決める
2. 2 倍高調波の割合を設定する
3. 縦方向トラッキングシミュレーションを行い、位相空間分布やビームロス等を評価
4. パターン (2 倍高調波割合、位相) を修正し、またシミュレーションを回す

と手間と時間をかけて行っている。

より平坦なビームを生成するために 3 倍、4 倍高調波を加えるとすると、手間と時間は膨大。

深層強化学習で電圧パターンの最適化を行うことができるのではないか、と考えた。

1. はじめに

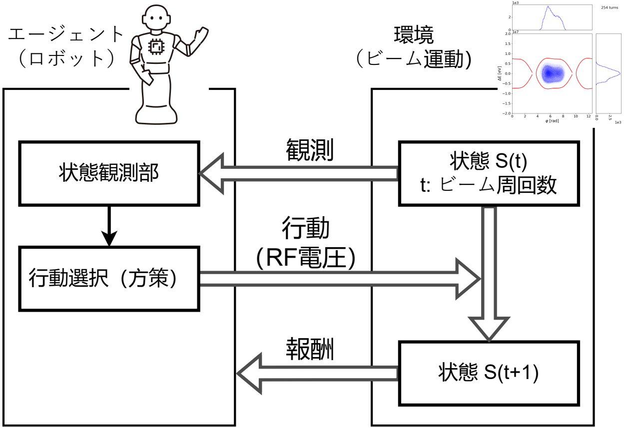
2. 電圧パターンの設定

3. 深層強化学習の適用

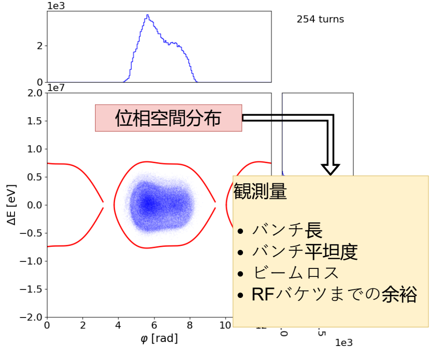
4. 実装

5. 今後

深層強化学習の適用



エージェント
（ロボット）
環境
（ビーム運動）
状態観測部
行動選択（方策）
観測
行動
（RF電圧）
報酬
状態 S(t)
t: ビーム周回数
状態 S(t+1)

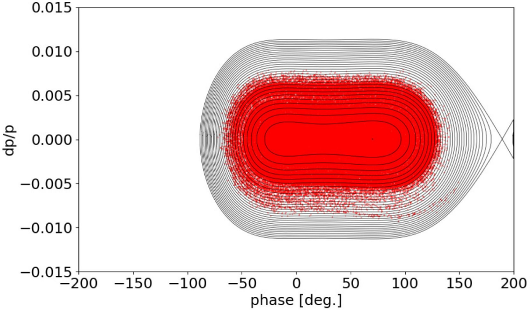


1e3
254 turns
1e7
ΔE [eV]
φ [rad]
位相空間分布
観測量
• バンチ長
• バンチ平坦度
• ビームロス
• RFバケツまでの余裕

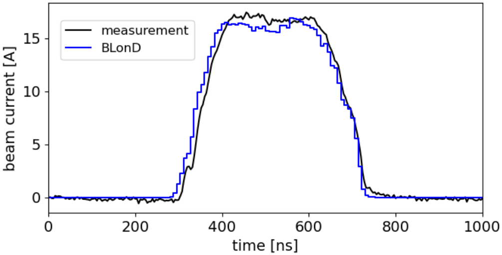
環境: BLonD による縦方向シミュレーション

BLonD

Beam Longitudinal
Dynamics simulator



BLonD シミュレーションで得られる RCS ビームの位相空間分布の例。



BLonD シミュレーションと実測のビーム波形の比較。よく一致する。

BLonD は RCS でのビーム挙動をよく再現できる。

構想

縦方向シミュレーションを環境として DRL を進めていけば、DRL は最適な行動 (最適な RF 電圧) を出力するようになるのではないか？

- 基本波のみの場合: エミッタンスとフィリングファクターから、RAMA で答え合わせ可能
- 報酬: M_f や B_f 所望の値 +10、ビームロス ($dp/p >$ limit) -10000 中途終了、などなど
- 基本波でうまく行ったならばデュアル、トリプルハーモックに拡張できるか？

1. はじめに

2. 電圧パターンの設定

3. 深層強化学習の適用

4. 実装

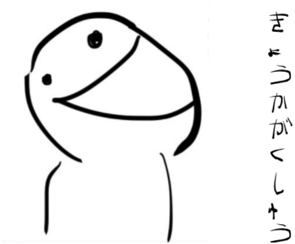
5. 今後

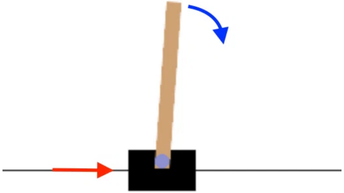
実装

まだぜんぜん実装していないのが現状。

- 深層強化学習お勉強中

実装





まだぜんぜん実装していないのが現状。

- 深層強化学習お勉強中

今後

ともかく実装しますので、助言よろしくお願いします。