STF空洞のERLへの適用に関するBBUの計算

- 目的(経緯)と方法
- 羽島氏の計算との比較
- 6GeV ERL @JAEAの計算結果との比較
- STF空洞をERLに適用した場合の結果
  - HOM parameterの単純な置き換え
  - HOM Randomizationを考慮した場合
  - HOMを増やした場合
  - 増やしたHOMの場合のRandomizationの結果
  - TE iris modeの考慮
  - ERL空洞の場合で20MHzまで延長した結果
- まとめ

目的(経緯)と方法

- 目的(経緯)
  - 山口主幹よりSTF空洞をERLに適用した場合のHOM BBUの計算を依頼される(昨年11月頃)。
  - 実際に置き換えた場合にどれほどのビーム電流が見込めるか？を検証する。特に、HOM Randomizationが1MHzの場合に100mAに到達できるかどうかを検証する。
- 方法
  - Cornell大学のIvan Bazarov氏の開発したbi (Beam Instability Code)を用いて計算する。
  - JAEAの羽島氏がKEK Report 2007-7(コンパクトERLの設計研究)で行ったプログラムを借用する。
  - 羽島氏のプログラム中ではHOMやOptics条件を定義すると、自動的にbiの初期条件として組み込めるようになっている。
  - 実行スクリプトはPerlで行っている。

biとは何か？

- Cornell大学のIvan Bazarov氏により開発されたコード
- 関連ホームページは以下の通り
  - biに関するホームページ
    - http://www.lepp.cornell.edu/~ib38/bbu/
  - Ivan Bazarov氏のホームページ
    - http://www.lepp.cornell.edu/~ib38/
- このページに置いてあるドキュメントを読むと、ユーザーは以下のパラメータを自分で決めて、その後biを走らせよ、という説明書きがある。
  - Parameter file
    - beam energy, beam currentなど
  - Lattice file
    - 6x6 transfer matrixの各成分
  - HOM data file（今回の計算で変更する箇所）
    - R/Q, Q, f, polarization (0° or 90°)

様々なBBU計算コード

- BBUの計算にはすでに以下のようなコードが用意されている。
  Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 557 (2006) 176-188より
  - BBU-R (JAERI)
  - TDBBU (J-lab)
  - New Code (J-Lab)
  - bi (Cornell Univ.)
  - MATBBU (J-Lab)

羽島氏のプログラムの内容

- 羽島氏のプログラム（C言語）ではbiの初期条件であるLatticeデータを計算し、HOMなどの他のパラメータと共に入力ファイルとして用意するようになっている。
  - Latticeデータは手で打ち込むには膨大のため

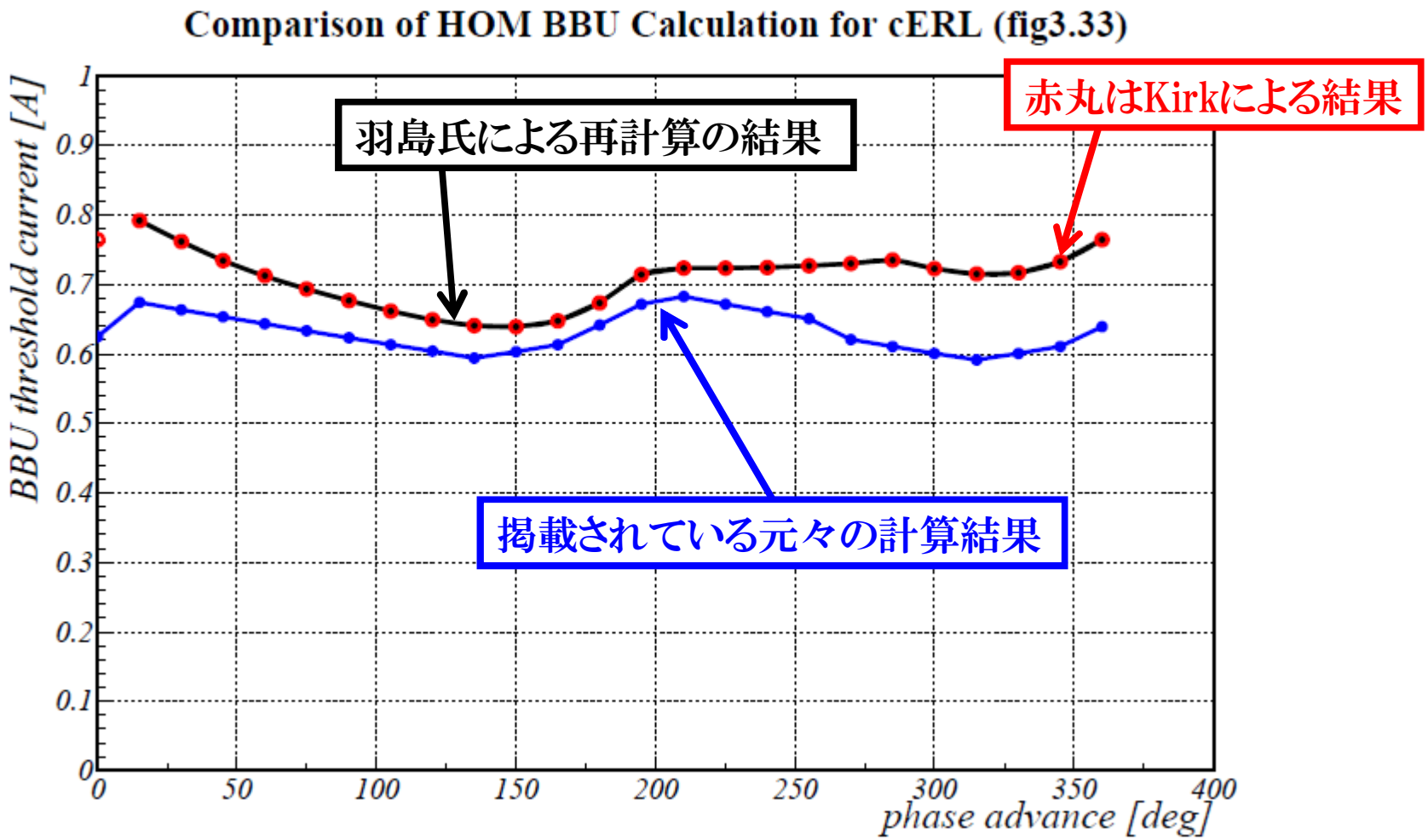
- 実行スクリプトはPerlで、HOM Randomizationはこの中で行っている。
  - HOMのばらつき具合をガウス分布とし、幅σを少しずつ変更させながら各σ毎に10回ずつ計算を行うようになっている（ガウス分布のサンプル数が10個ということ）。ガウス分布の±1σに66%が含まれることを考えると10回というのは少ないように思われるが、計算が長時間かかるためとりあえず10回としているようである。

羽島氏の計算結果との比較

- STF空洞のERLへの適用についての計算を行う前に、羽島氏が以前行った計算と同じ結果が得られるかどうかをまず行った。
- 具体的には、「コンパクトERLの設計研究」のp.125～126に載っている図3.33, 図3.34, 図3.35が再現するかどうかを確認した。
- 結果は次ページ以降に載せてあるが、図3.33及び図3.35は羽島氏の結果と一致した。図3.34のクロスチェックは羽島氏が多忙のため行っていない（図3.34の計算は他の二つに比べて時間がかかる）。
- ただし、羽島氏が以前行った計算はbi中の計算精度を決めるパラメータがデフォールトの0.1%から5%に上げて行っていたため（マシンパワーが非力であったことによる）、以前の結果とは異なっているが、再度羽島氏により計算が行われ、最新の結果が得られている。

羽島氏の計算結果との比較①

図3.33



両者ともに良く一致している。

羽島氏の計算結果との比較②

図3.34

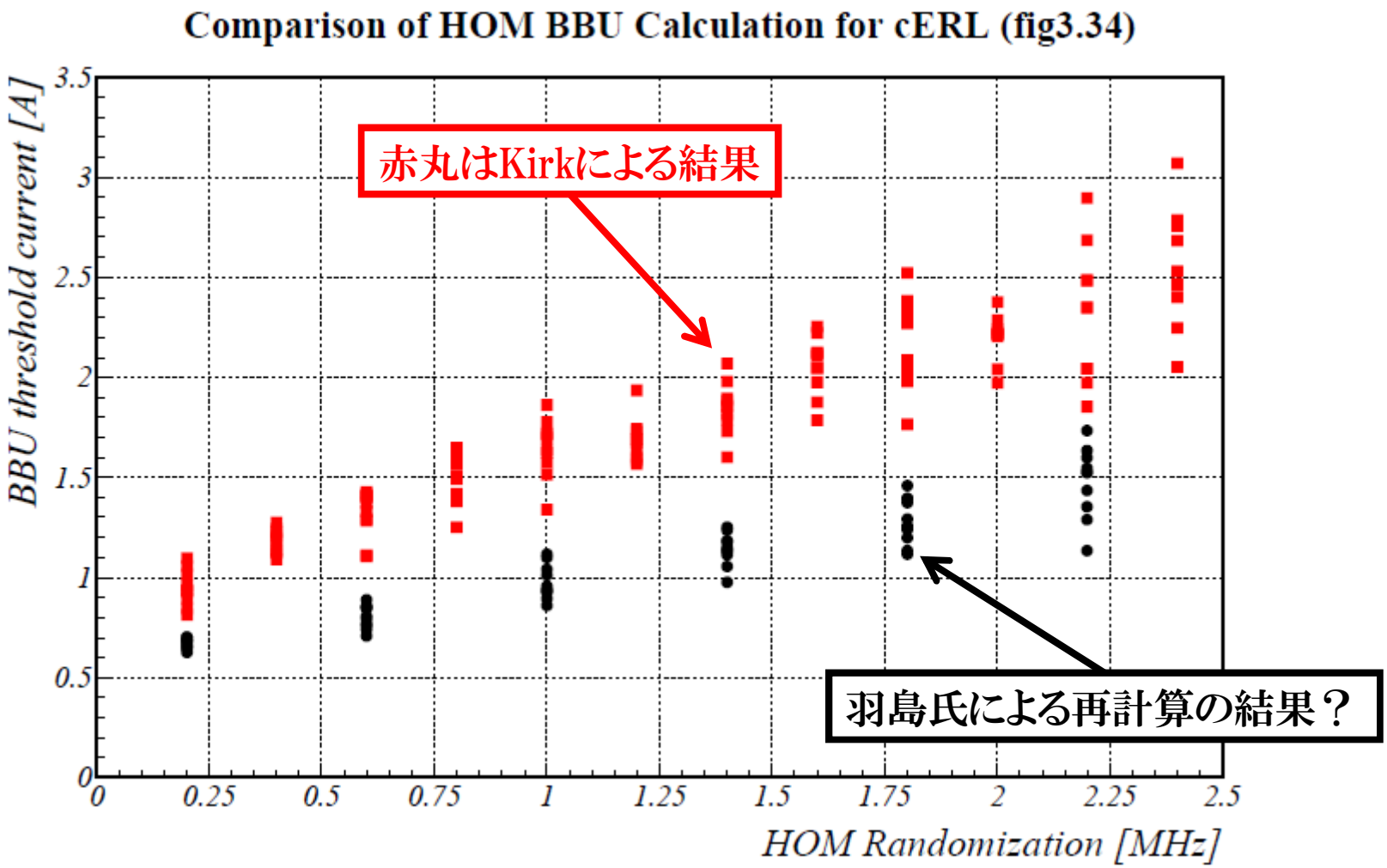
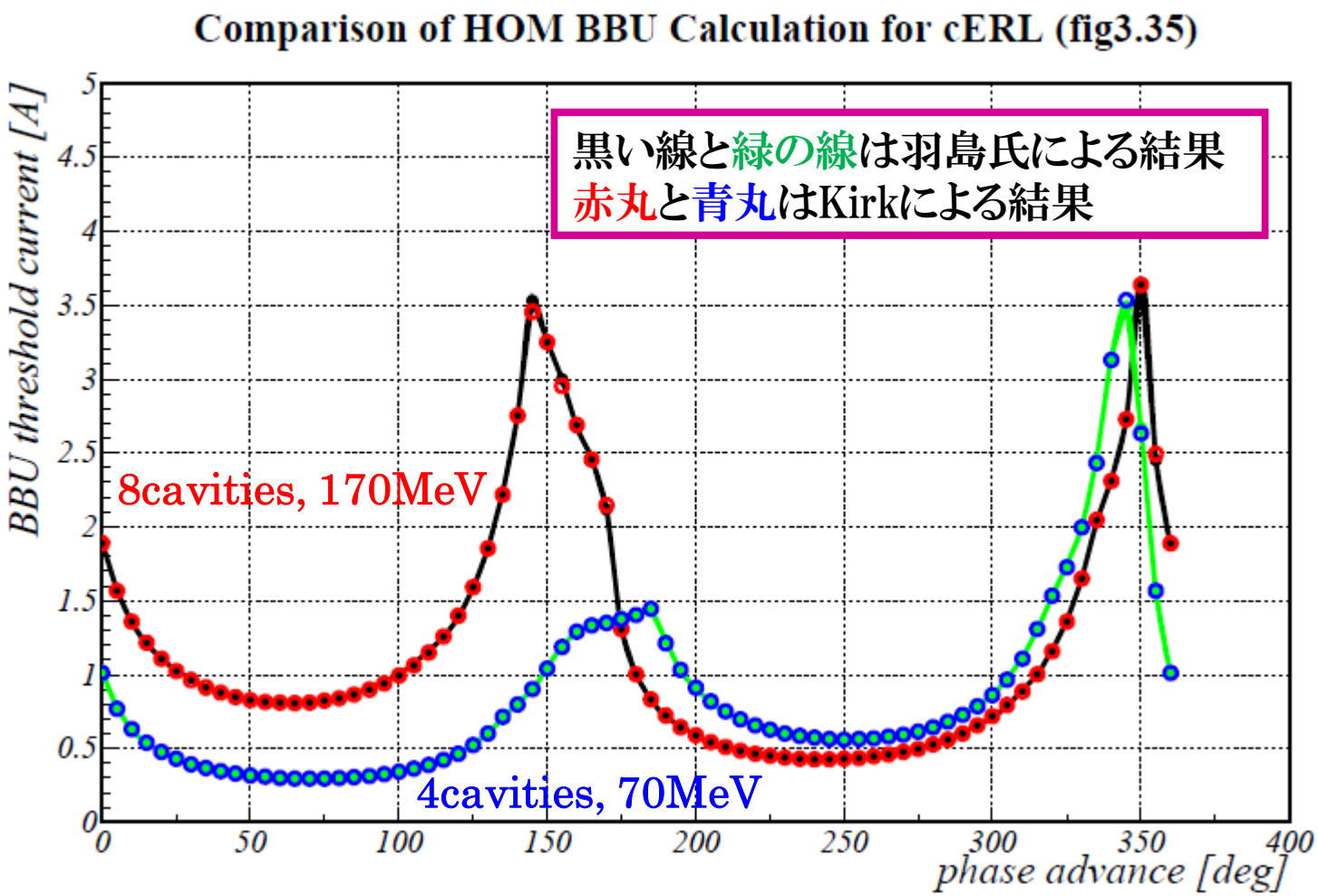


図3.34に掲載されている結果は羽島氏から頂いたファイルには無かった。
代わりに別の条件下で行われたと思われる結果があり、それが黒点のプロットである。
Kirkによる結果（赤点）は、むしろ元々の計算結果に近いように見える。

羽島氏の計算結果との比較③

図3.35



両者ともに良く一致している。

以上で羽島氏の計算との照合は無事終了したことにして、いよいよSTF空洞のERLへの適用についての計算を行なうことにした。

STF空洞をERLに適用した場合

計算の手順

① 6つのHOMのパラメータを入れ替えてみる
② 6つのHOMの場合でRandomizationを行ってみる
③ HOMの数を増やしてみる
④ 増やしたHOMの場合でRandomizationを行ってみる(失敗)
⑤ TESLAのHOMパラメータで行ってみる
⑥ TESLAのHOM Randomizationを行ってみる(失敗)
⑦ STF空洞にTESLAのTE-iris modeを追加してみる(7 HOMs)
⑧ ⑦の場合のHOM Randomizationを行ってみる
⑨ HOM Randomization⑧で10MHzまでの計算を行ってみる。
⑩ HOM Randomization⑧で繰り返しを20回にしてみる。

計算に使用したPCのスペックと計算時間

	PC1	PC2
Specification (CPU / Memory)	AMD Opteron Processor 248 / 2.1GB	Dual-Core AMD Opteron Processor 2222 / 4.1GB
Test #	Calculated time [sec]	
①	45190	32578
②	222684	159237
③	130942	93230
④	not finished	not finished
⑤	39005	27570
⑥	not finished	not finished
⑦	53167	37175
⑧	259904	Not recorded
⑨	234936	167661
⑩	511137	364587

Test④だけはHOMのパラメータが多すぎるのか計算が途中終了し最後まで行えなかった。

HOMのパラメータを入れ替える

梅森氏より

f [GHz]	R/Q [Ω]	Q
4.011	4.542	1.141×10^4
1.856	48.32	1.698×10^3
2.428	26.26	1.689×10^3
4.330	0.02186	6.068×10^5
3.002	0.8210	2.999×10^4
1.835	54.68	1.101×10^3

加古氏と渡邉氏より

f [GHz]	R/Q [Ω]	Q
1.719	42.00	4.370×10^3
1.878	25.40	1.050×10^5
1.604	0.448	3.840×10^5
1.688	10.98	1.450×10^4
1.887	7.880	2.150×10^5
1.895	0.400	4.720×10^5

羽島氏の計算で使われていたHOM

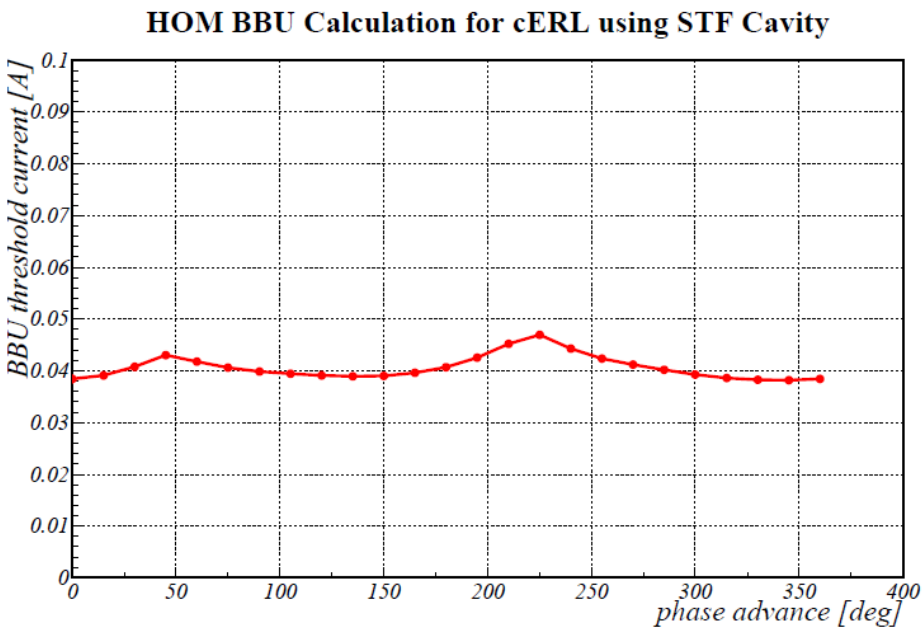
※STF空洞のR/Qはビーム軸から20mmのところでMAFIAで計算した(ビームパイプの半分のところ)。
fとQはS1-Globalにおける4K冷却時のネットワークアナライザによる測定値で、インピーダンスの高い順に6つ選んである。
HOMはTM_{110}またはTE_{111}である。

TE iris modeは含まれていない

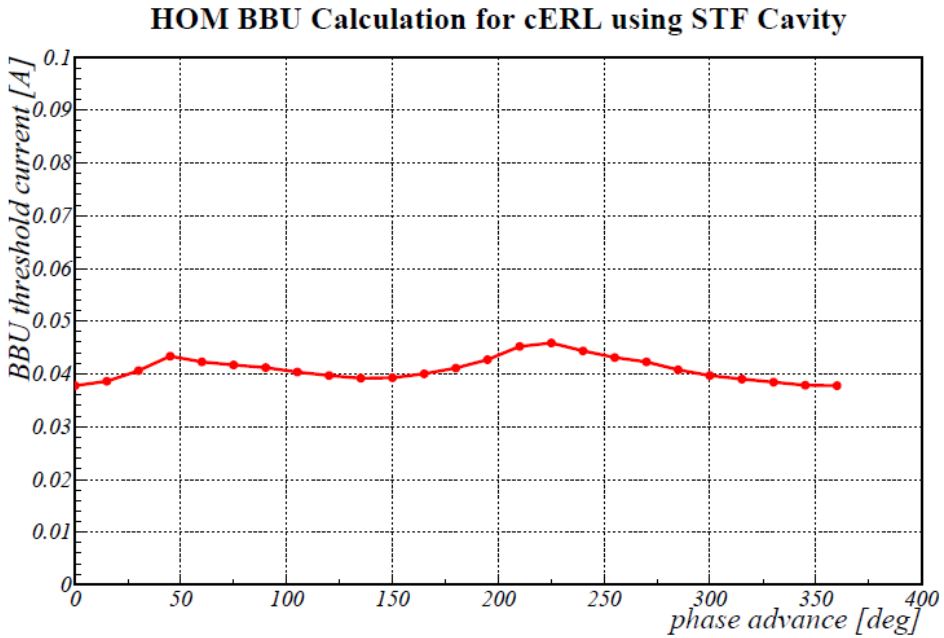
計算結果①

図3.33と同様の計算を行ってみる

6個のHOMの場合



18個のHOMの場合
(TM_{110}とTE_{111}の全て)

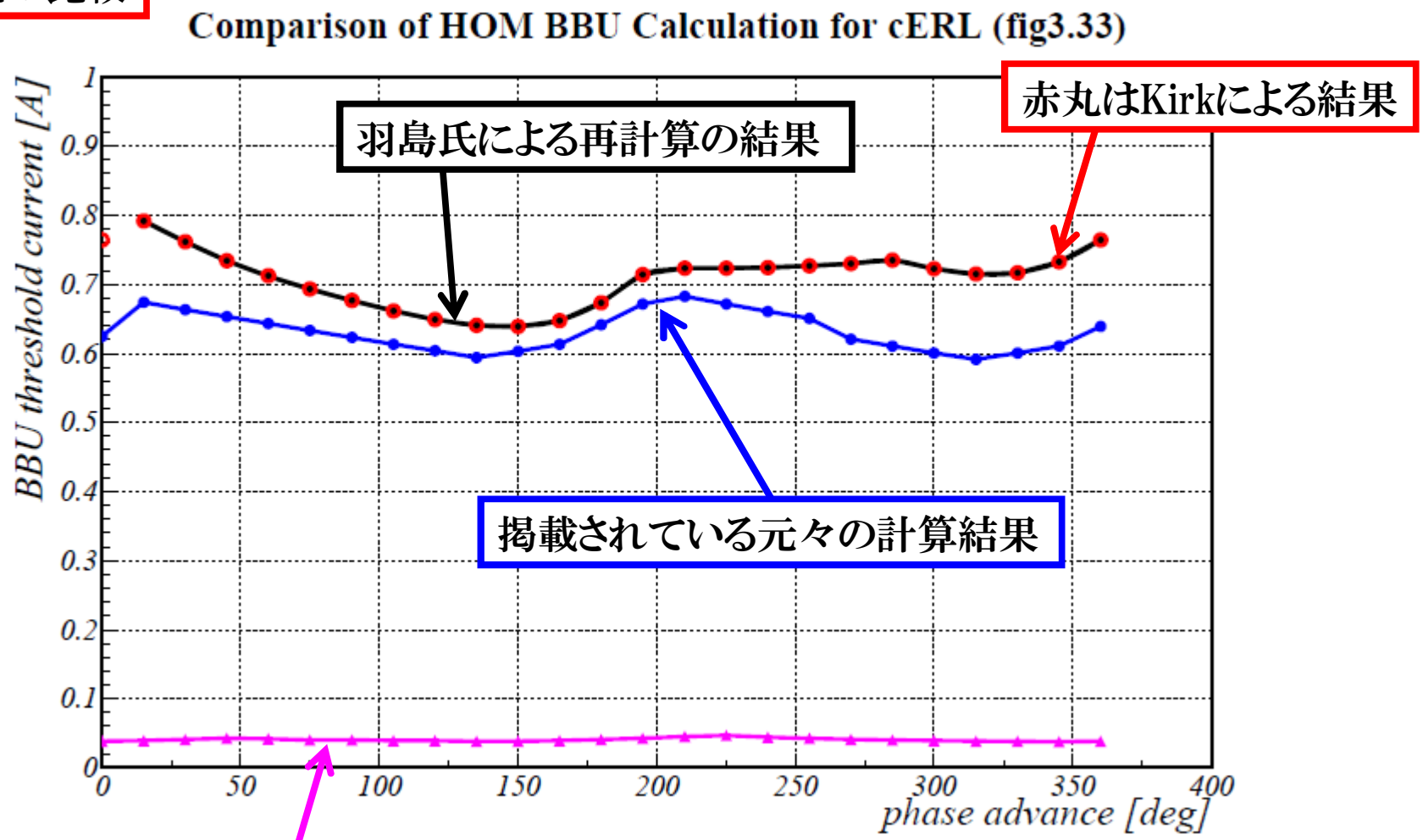


比較的インピーダンスの低いHOMの数を増やしても
計算結果にはあまり影響を与えないようである。
計算時間が長くなるだけであまり意味が無いため、
今後は前出の6個のHOMのみ考慮することにする。

TE iris modeは含まれていない

計算結果②

図3.33との比較

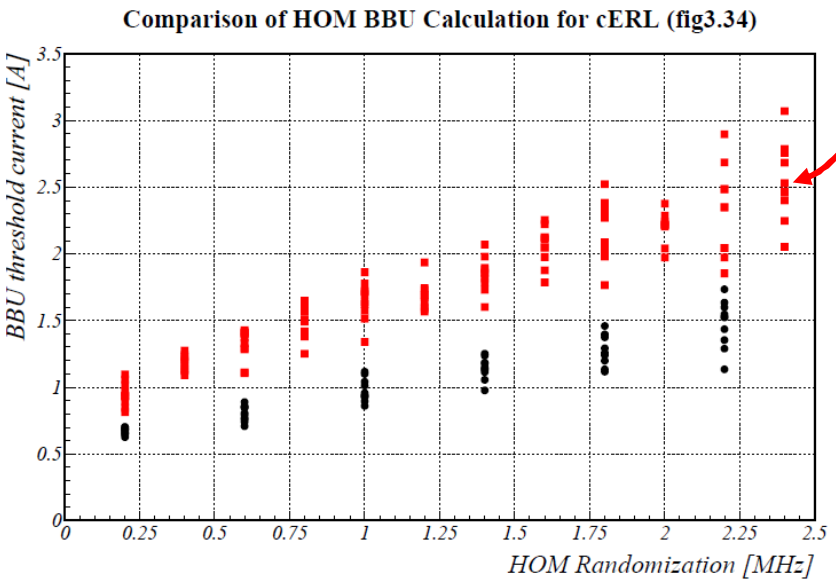


STF空洞を用いた場合の計算結果

TE iris modeは含まれていない

HOM Randomizationの入れ方

- あるHOM周波数(複数可)を中心として、ある幅σを持ったガウス分布でHOM周波数を振ってbiの計算を行う。
- 各σにおける計算回数はdefaultで10回となっている。
  - この回数が十分であるかどうかは要検討。

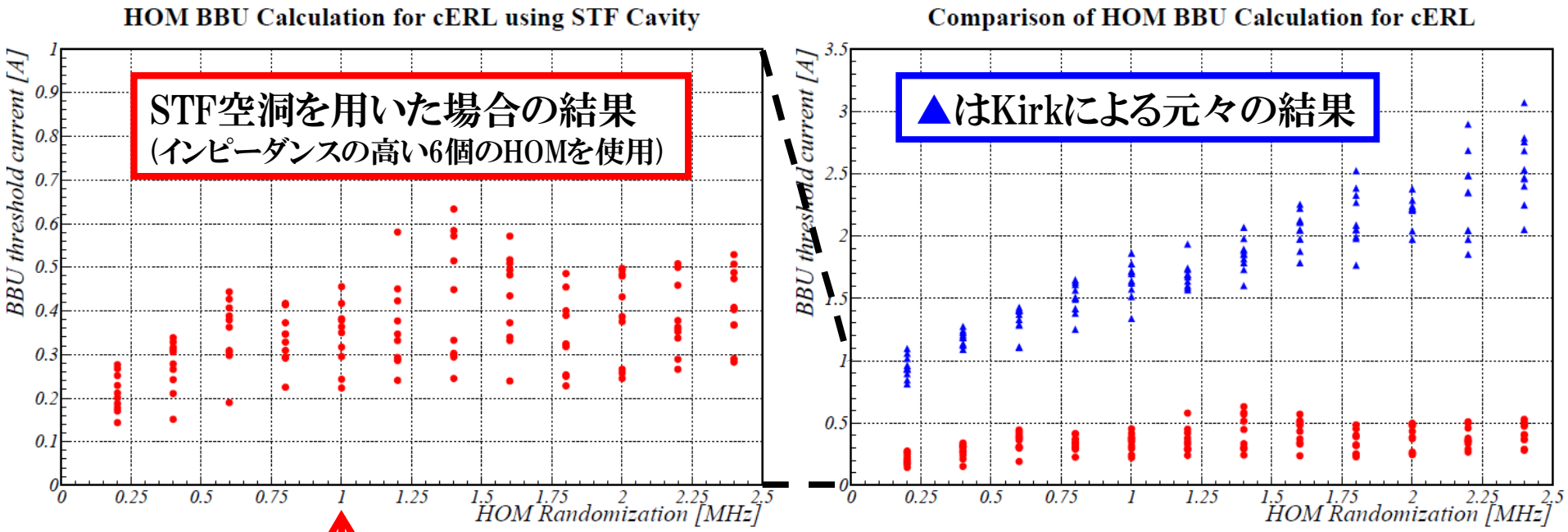


この各点が１０個ずつあるということ

HOM周波数の幅σに相当

計算結果③

図3.34との比較

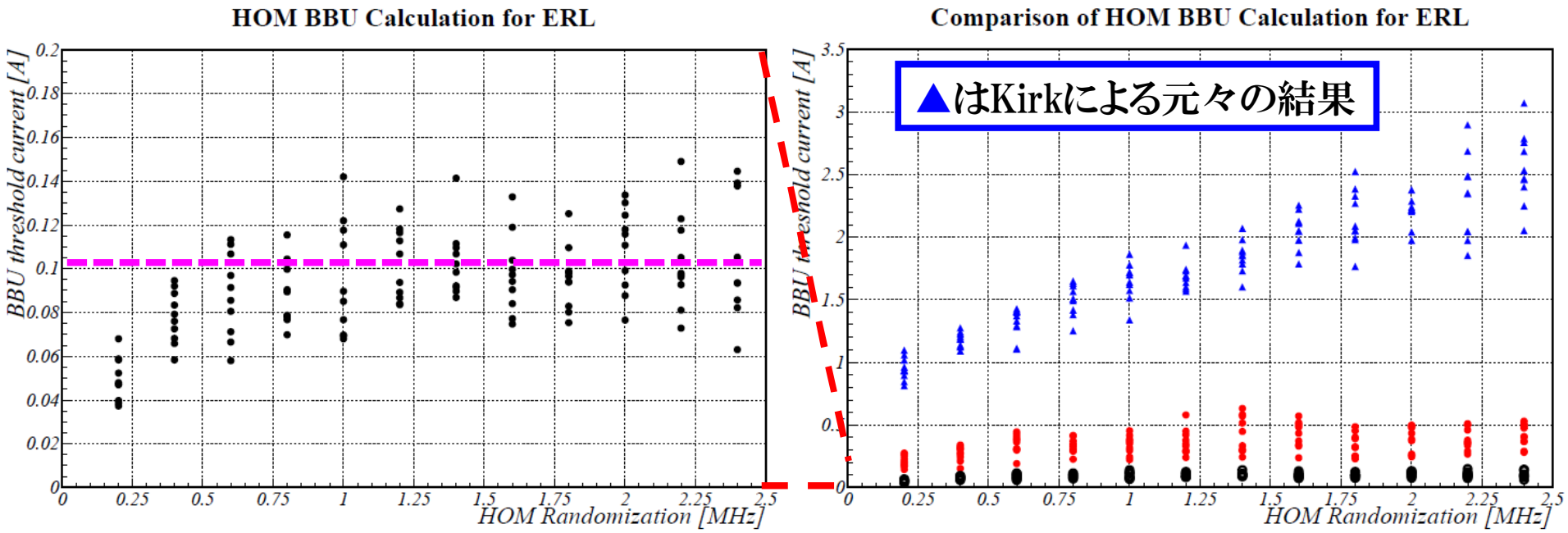


1MHzで100mAは超えているようである。
1MHz以上ではthreshold currentはサチっているように見える。

TE iris modeは含まれていない

計算結果④

図3.34との比較

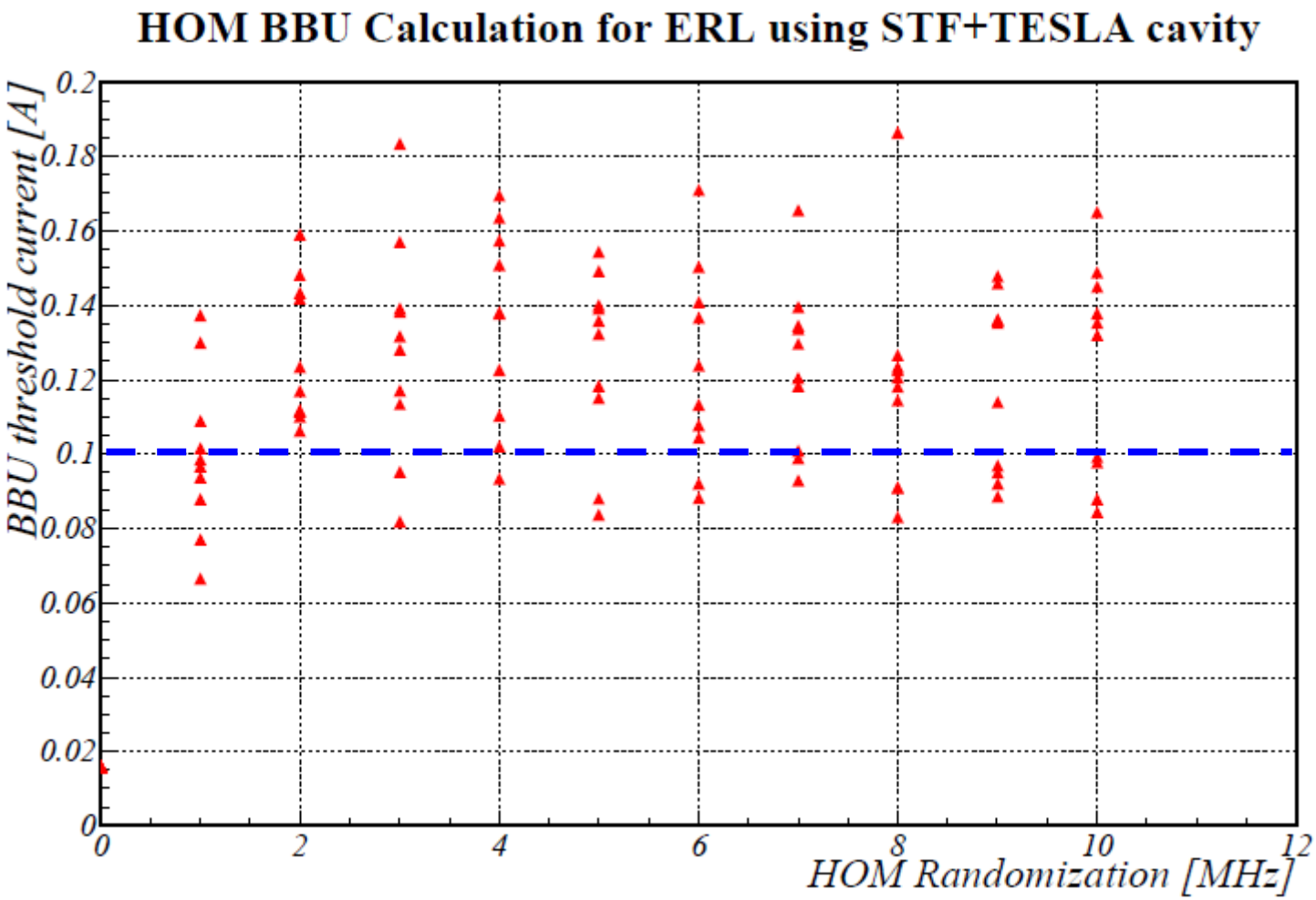


STF空洞を用いた場合の結果。
目標の100mAには到達していない。
(インピーダンスの高い6個のHOMにTE iris modeを追加。
ただし、パラメータはTESLAのもの。)

STF空洞はエンドセルが対称のため、TE iris modeのdampingはさらにきつく、
Q_{ext}で一桁以上高くなるものと推測されている。

計算結果⑤

STF空洞を用いて10MHzまで延長した場合の結果。



ERL空洞を用いた再計算の続き

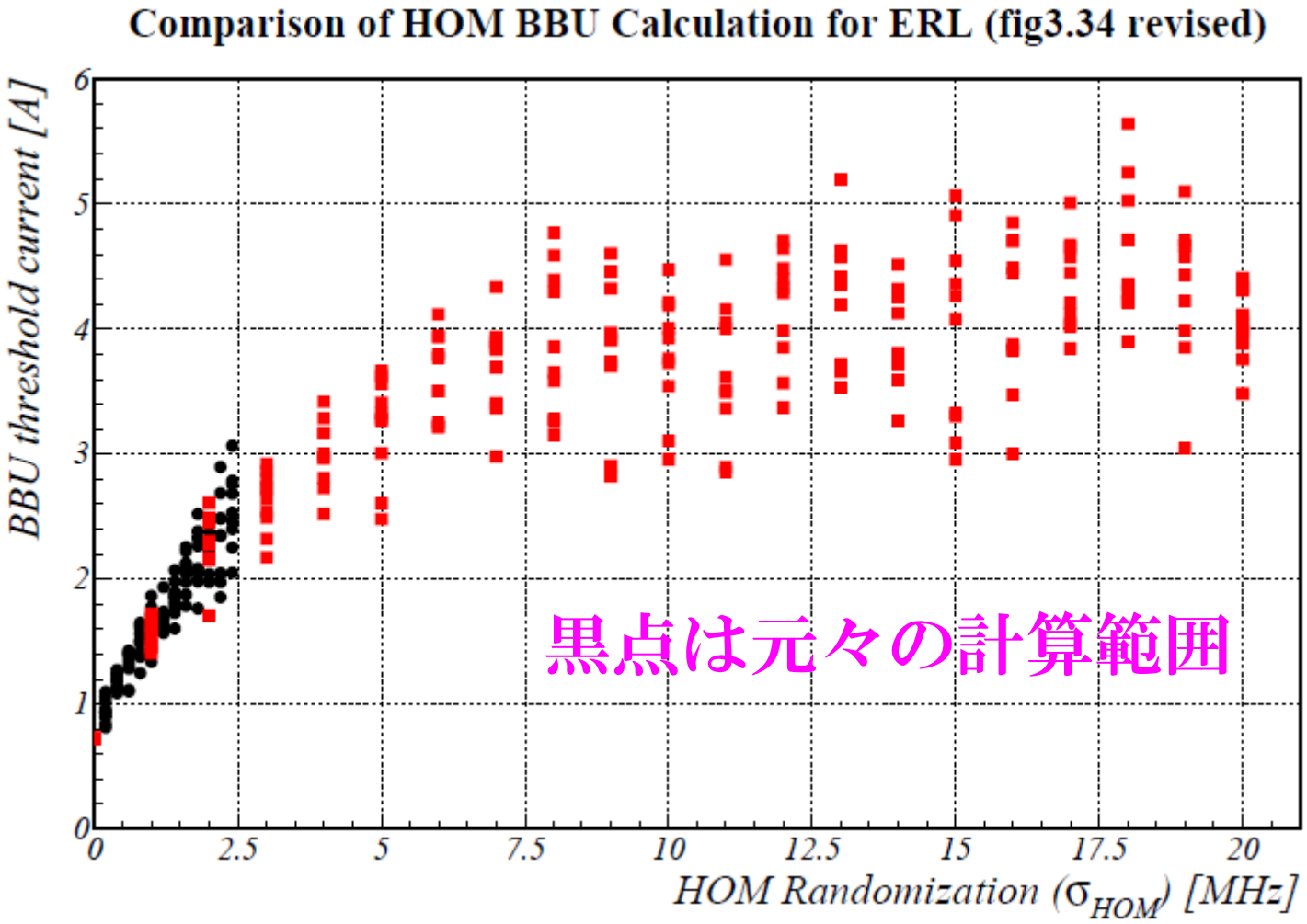
計算の手順

① ERL空洞の場合で20MHzまで延長してみる。
② ERL空洞の場合で繰り返しを50回にしてみる。

	PC1	PC2
Specification (CPU / Memory)	AMD Opteron Processor 248 / 2.1GB	Dual-Core AMD Opteron Processor 2222 / 4.1GB
Test #	Calculated time [sec]	
①	390693	145148
②	–	722267

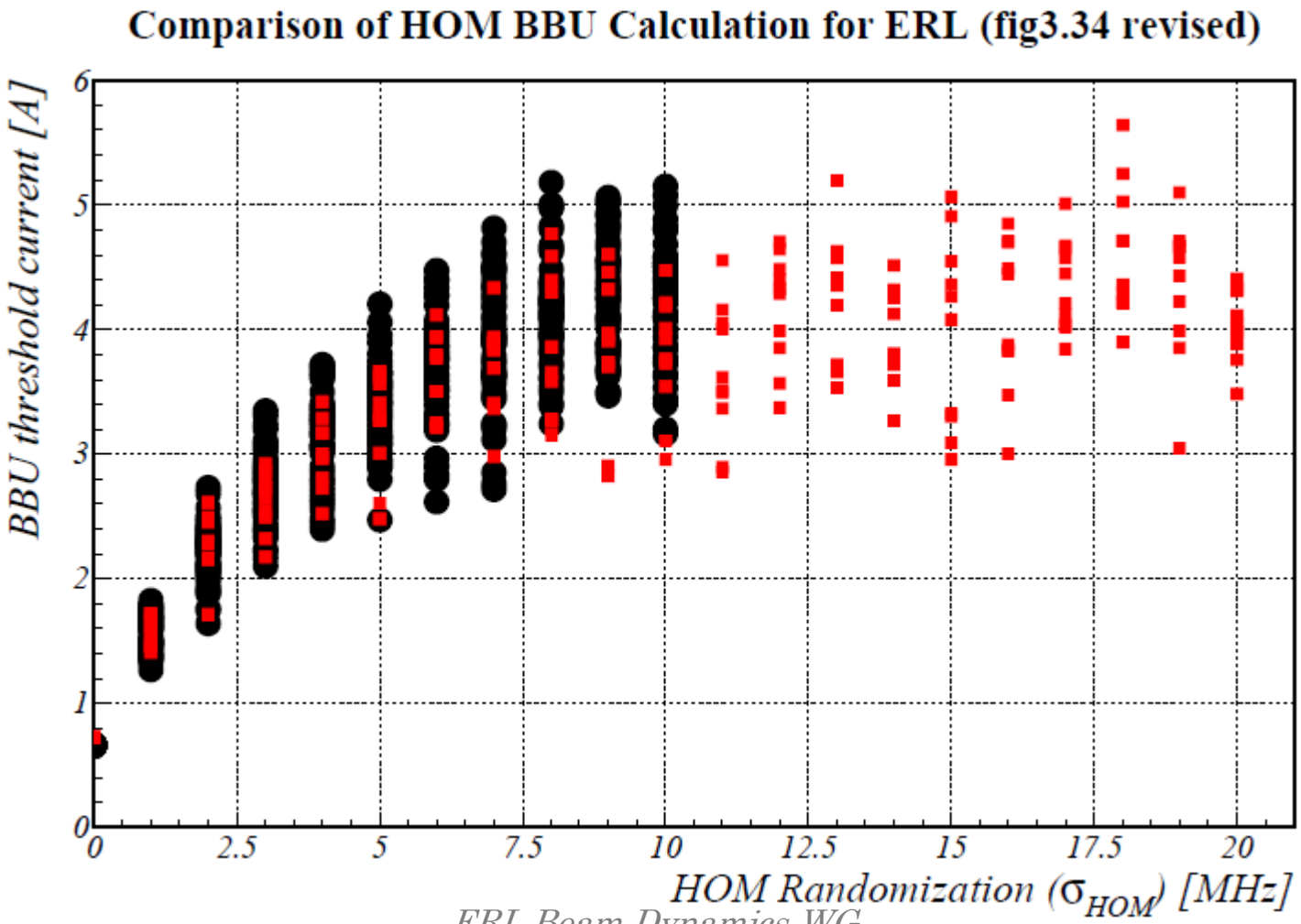
ERL空洞を用いた再計算の続き①

ERL空洞を用いて20MHzまで延長した場合の結果。



ERL空洞を用いた再計算の続き②

ERL空洞を用いた場合の繰り返し数を変えた結果。
10回（赤点）と50回（黒点）の比較。



BBU-Rの計算（HOMデータ）

羽島氏の資料より

ERL=TESLA＋ビームパイプ拡張＋HOM吸収体

TE-iris mode

ERL	freq (Hz)	Q	R/Q*Q(Ω/m^2)	R/Q(Ω/m^2)	λ(m)	R/Q(Ω)
	2.575E+09	4.890E+03	1.0444E+09	2.1358E+05	0.1164	73.33
	1.873E+09	1.160E+04	1.0215E+09	8.8060E+04	0.1601	57.15
	1.866E+09	7.730E+03	4.9745E+08	6.4353E+04	0.1607	42.08
	1.879E+09	1.830E+04	5.5875E+08	3.0533E+04	0.1595	19.69
	3.082E+09	3.360E+04	3.2902E+08	9.7923E+03	0.0973	2.35
TESLA	2.575E+09	5.000E+04	1.1900E+10	2.3800E+05	0.1164	81.72
	1.875E+09	5.110E+04	4.4968E+09	8.8000E+04	0.1599	56.99
	1.865E+09	5.060E+04	3.2890E+09	6.5000E+04	0.1607	42.54
	1.881E+09	9.510E+04	1.7118E+09	1.8000E+04	0.1594	11.58
	1.887E+09	6.330E+05	1.2660E+09	2.0000E+03	0.1589	1.28

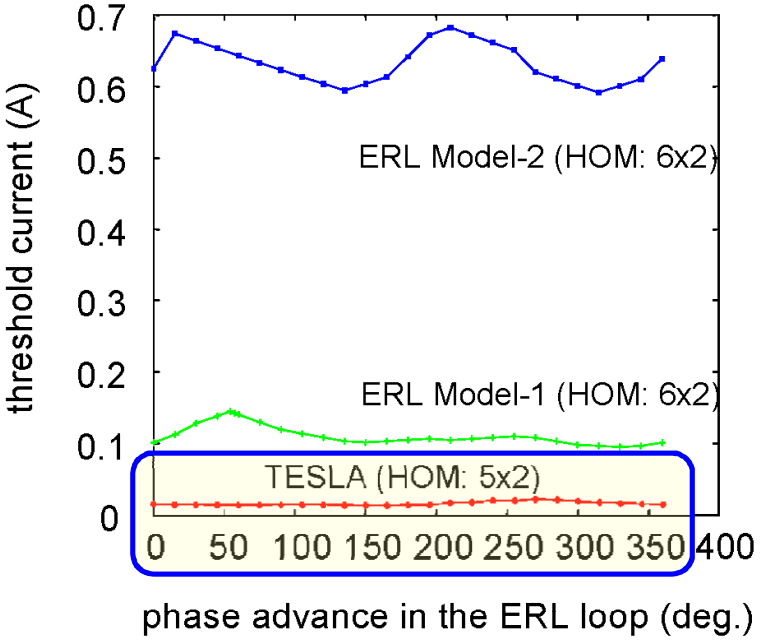
TE-iris modeはSTF空洞の計算では考慮されていない

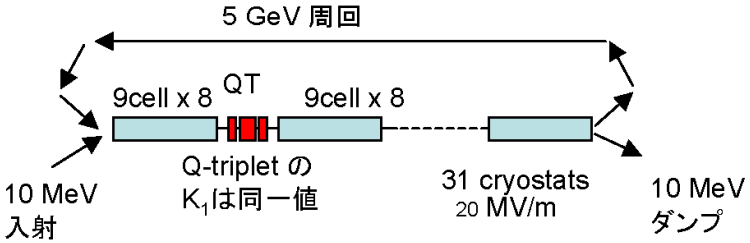
各周波数モードがx、y方向にあるとした

羽島氏の資料より

HOM randomization の効果（1）

周回のベータトロン位相進みと閾値電流 (BI)





入射エネルギー　E_{inj} = 10 MeV
周回エネルギー　E_{loop} = 5 GeV
リニアックを含めた周長 L = 1466.1 m (RF x 6357.5)
加速勾配　E_{acc} = 20 MV/m
収束磁石　QT K_1 = 2 m^{-2}（BI）
K_1 = 最適化（BBU-R）

羽島氏のスライドに書かれてある $(R_t/Q)*Q_{ext}/f_{HOM}$ を比較してみる①

ここにR_t/Qの単位は[Ω/m^2]で、$(R/Q)*k^2=R_t/Q$の関係にある。

STF空洞の場合

f_{HOM} [GHz]	R/Q [Ω]	Q_{ext}	R_t/Q [Ω/m^2]	$(R_t/Q)*Q_{ext}/f_{HOM}$ [$\Omega/m^2/Hz$]
1.719	42.00	4.370×10^3	5.457×10^4	0.139
1.878	25.40	1.050×10^5	3.938×10^4	2.202
1.604	0.448	3.840×10^5	5.068×10^2	0.121
1.688	10.98	1.450×10^4	1.376×10^4	0.118
1.887	7.880	2.150×10^5	1.233×10^4	1.405
1.895	0.400	4.720×10^5	6.316×10^2	0.157

※STF空洞のbiの計算ではTE-iris modeが考慮されていないため、threshold currentがTESLAの場合に比べて高めに出る傾向にある。

羽島氏のスライドに書かれてある $(R_t/Q)*Q_{ext}/f_{HOM}$ を比較してみる②

ここにR_t/Qの単位は[Ω/m^2]で、$(R/Q)*k^2=R_t/Q$の関係にある。

ERL空洞の場合

f_{HOM} [GHz]	R/Q [Ω]	Q_{ext}	R_t/Q [Ω/m^2]	$(R_t/Q)*Q_{ext}/f_{HOM}$ [$\Omega/m^2/Hz$]
4.011	4.542	1.141×10^4	3.210×10^4	0.0913
1.856	48.32	1.698×10^3	7.311×10^4	0.0669
2.428	26.26	1.689×10^3	6.800×10^4	0.0473
4.330	0.02186	6.068×10^5	1.800×10^2	0.0252
3.002	0.8210	2.999×10^4	3.250×10^3	0.0325
1.835	54.68	1.101×10^3	8.087×10^4	0.0485

TE-iris mode

羽島氏のスライドに書かれてある $(R_t/Q)*Q_{ext}/f_{HOM}$ を比較してみる③

ここにR_t/Qの単位は[Ω/m^2]で、$(R/Q)*k^2=R_t/Q$の関係にある。

TESLA空洞の場合

f_{HOM} [GHz]	R/Q [Ω]	Q_{ext}	R_t/Q [Ω/m^2]	$(R_t/Q)*Q_{ext}/f_{HOM}$ [$\Omega/m^2/Hz$]
2.575	81.72	5.000×10^4	2.380×10^5	4.621
1.875	56.99	5.110×10^4	8.800×10^4	2.398
1.865	42.54	5.060×10^4	6.500×10^4	1.764
1.881	11.58	9.510×10^4	1.800×10^4	0.910
1.887	1.28	6.330×10^5	2.000×10^3	0.671

TE-iris mode

まとめ

- bi及び羽島氏のプログラムを用いて、STF空洞をERLに適用した場合のHOM BBUについて計算した。
- 羽島氏が以前行った計算結果との比較を行い、お互いの結果がよく一致していることを確認した。また、計算精度を高めて再計算を行った結果、threshold currentが高い方にずれることも確認した。
- STF空洞をERLに適用するにあたり、6つのHOMのパラメータを入れ替えて計算を行った。それ以上HOMの数を増やしても計算結果はあまり変わらなかった。ただし、TE-iris modeはSTF空洞におけるRFパラメータが不明なため考慮されていなかったが、考慮して再計算を行った。
- STF空洞をERLに適用した場合のHOM Randomizationの計算を行ったところ、1MHzで100mA超のthreshold currentを得た。ただし、最も主要なファクターであると思われるTE-iris modeは考慮されていなかったが、考慮して再計算を行ったところ、60mA超のthreshold currentを得た。1MHz以上ではサチっているようである。
- ERL空洞のHOM Randomizationの計算を20MHzまで延長して行った。