

第16回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ

# 超伝導信号処理回路と その天文分野への応用

March 8, 2016

横浜国立大学工学研究院  
山梨裕希, 小箱紗希, 小野智裕,  
坂下洋介, 吉川信行

# 内容

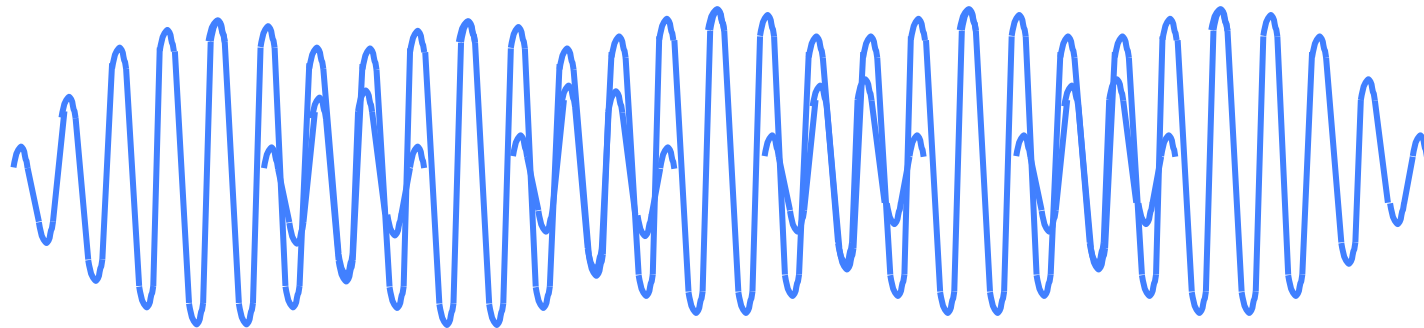
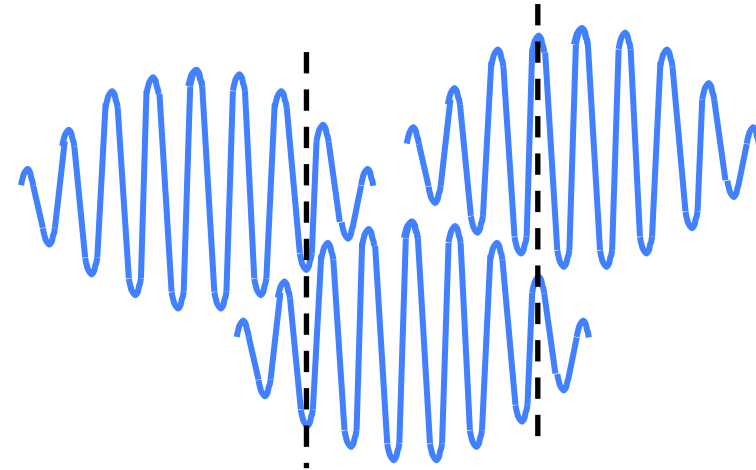
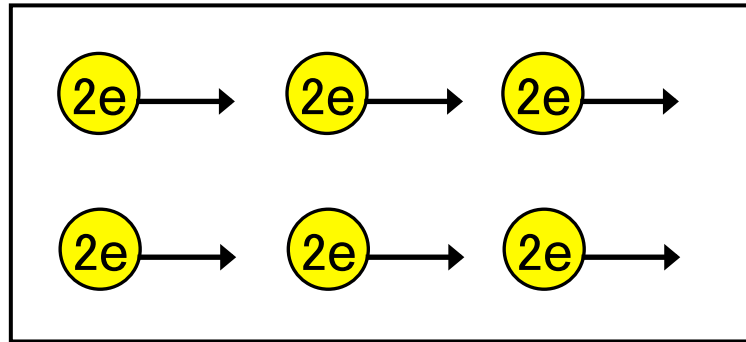
- 超伝導回路技術と、天文分野応用から見たその特徴
- 天文分野に使える(かもしれない)回路
  - ◆ 乱数生成回路
  - ◆ FFTプロセッサ
  - ◆ 自己相関器

# 内容

- 超伝導回路技術と、天文分野応用から見たその特徴
- 天文分野に使える(かもしれない)回路
  - ◆ 乱数生成回路
  - ◆ FFTプロセッサ
  - ◆ 自己相関器

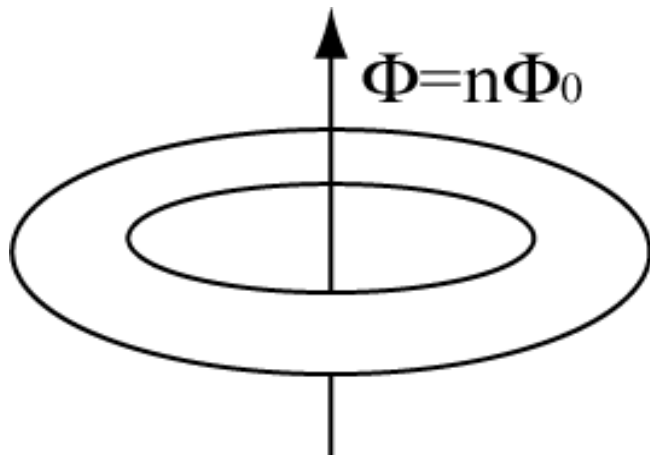
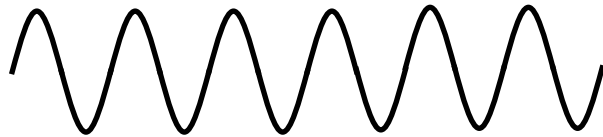
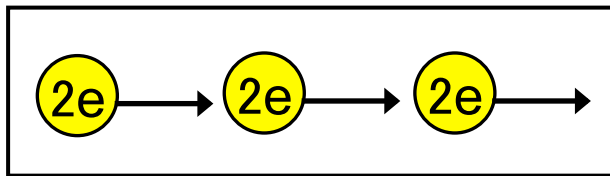
# 超伝導巨視的量子コヒーレンス

3

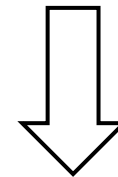


巨視的な系なのに、ひとつの  
波動関数による状態記述

# 超伝導回路におけるビット



位相の量子化条件：  
1周当たり $2\pi$ の整数倍

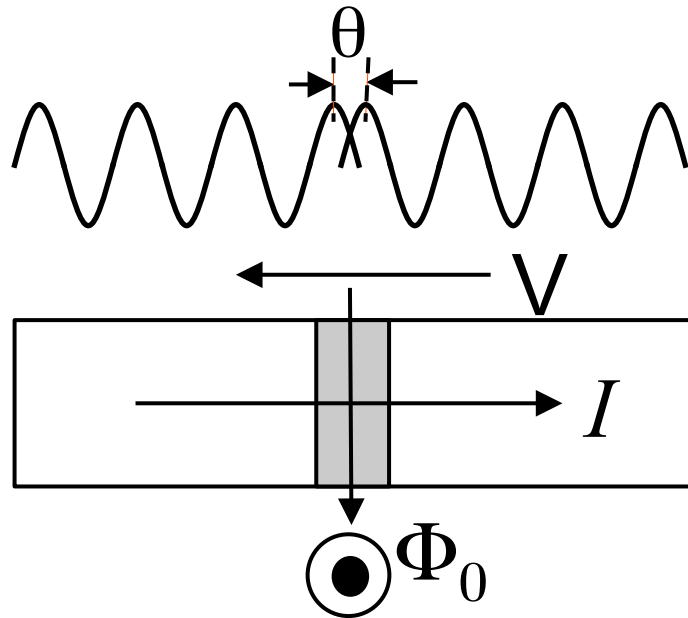


超伝導リング中の磁束：  
「磁束量子」の整数倍になる

$$\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$

磁束量子の有無でのビット表現

# 超伝導回路におけるゲート



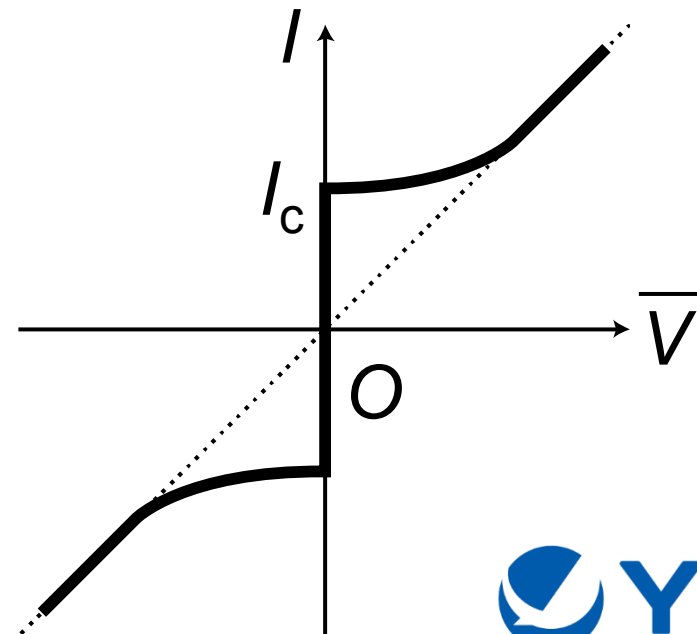
$$I = I_C \sin \theta$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\theta}{dt}$$

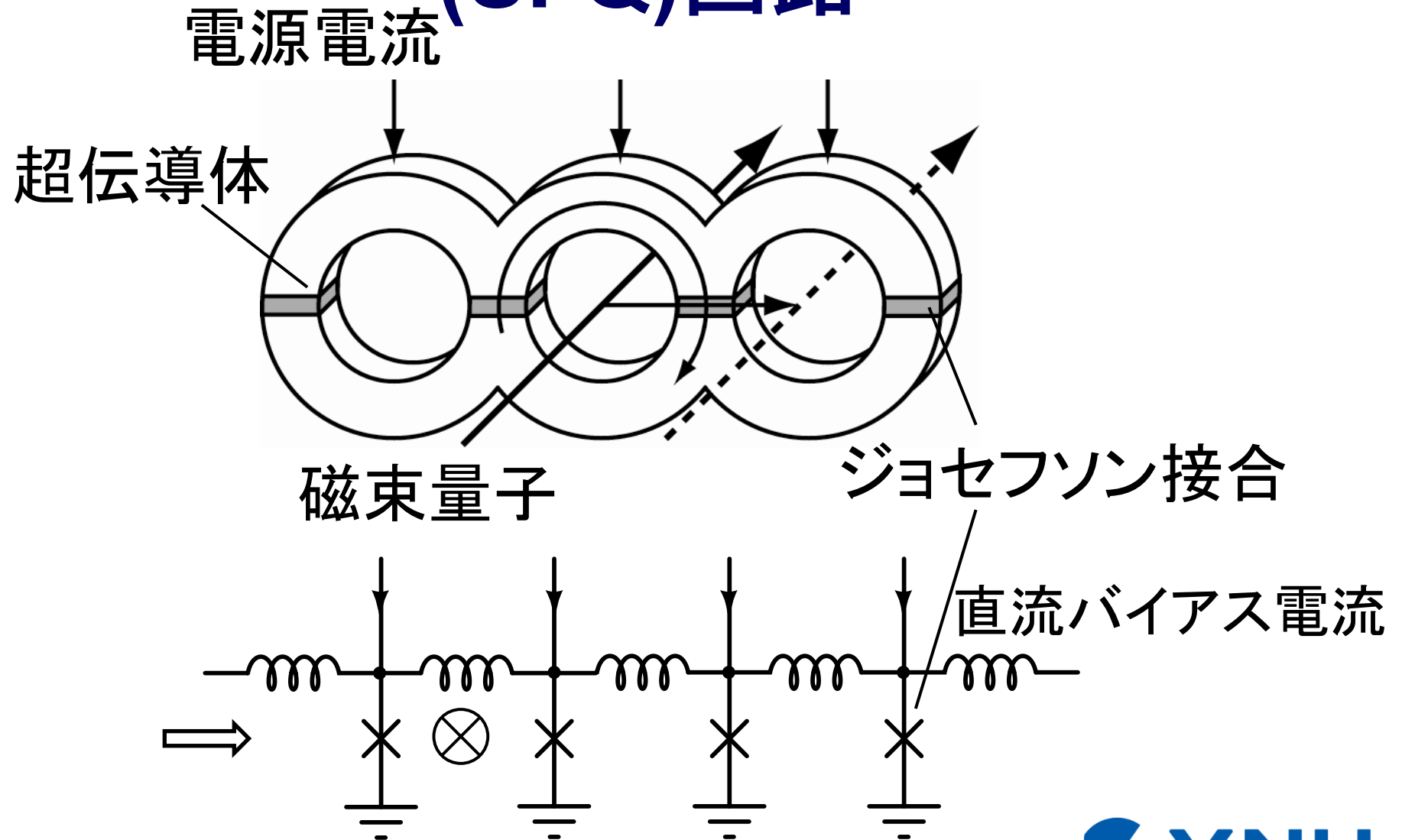
ジョセフソン接合 (JJ):  
 $\Phi_0$  にとってのゲート

$$\bar{V} = f\Phi_0$$

$f$ :  $\Phi_0$  の通過数/秒

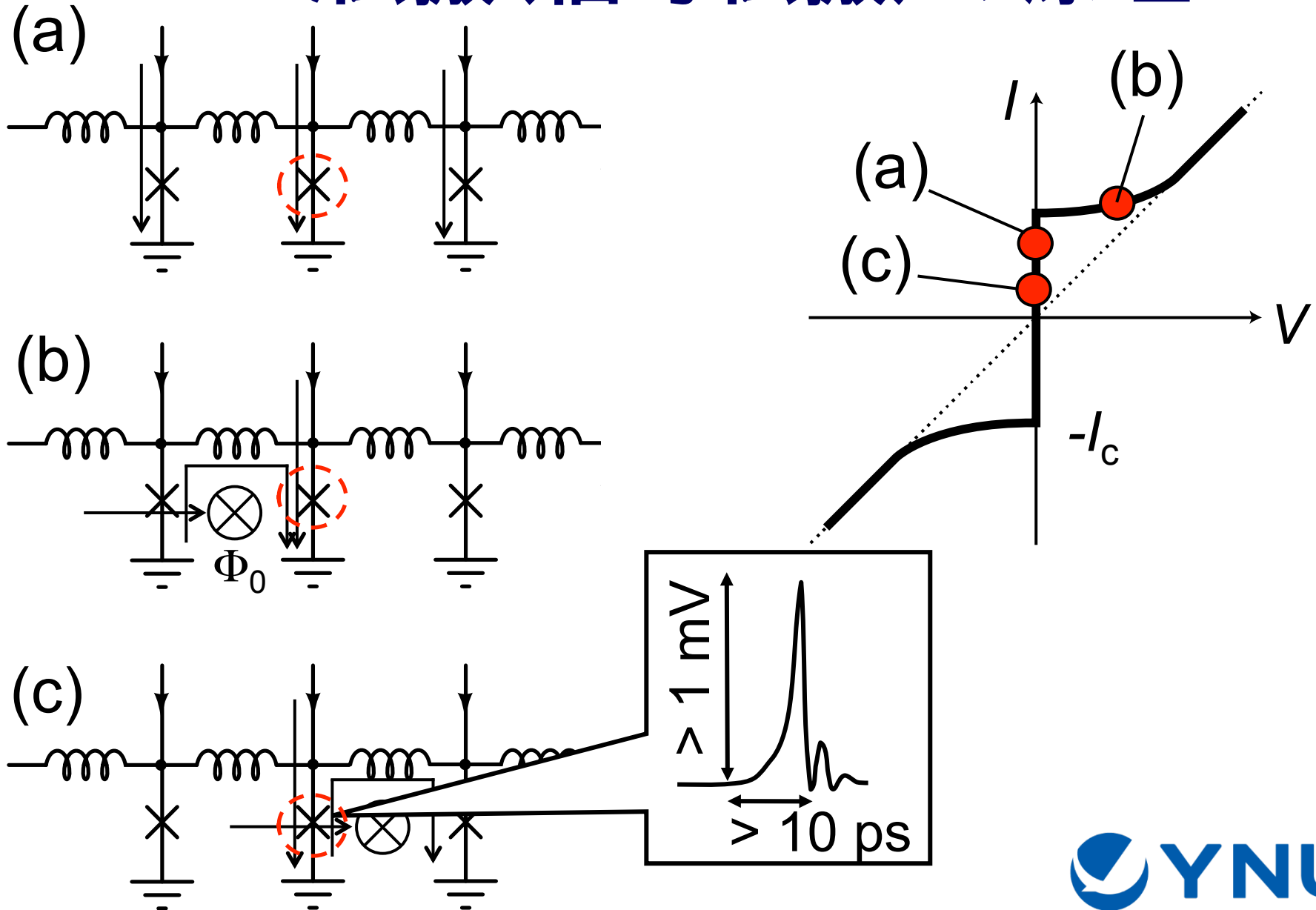


# Single Flux Quantum (SFQ)回路



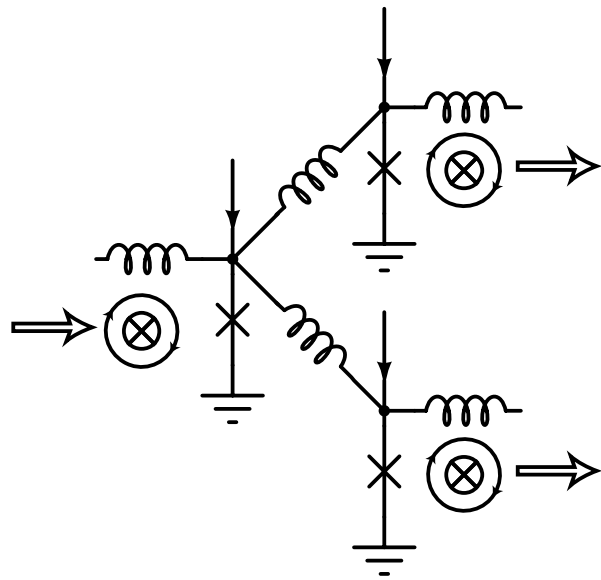
# SFQ伝搬(信号伝搬)の原理

7

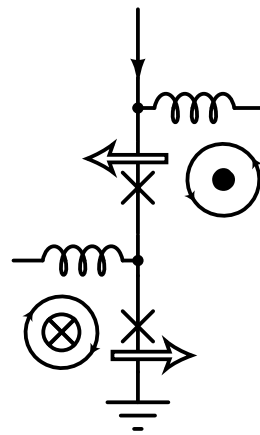




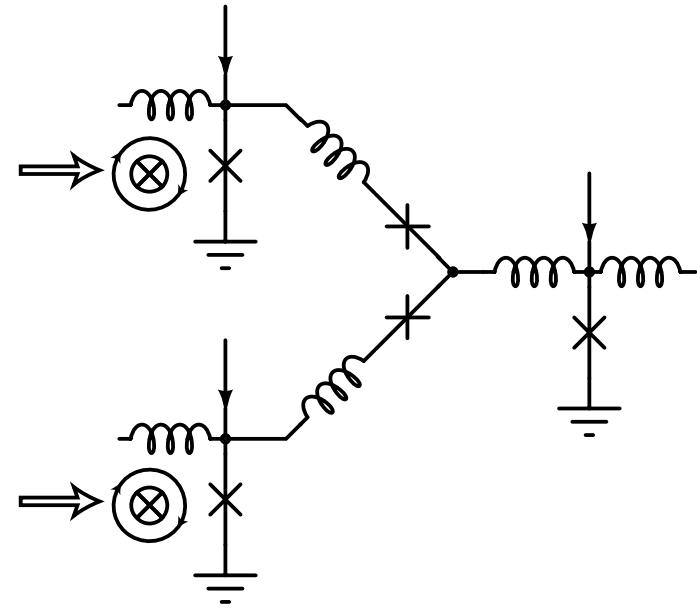
# SFQ信号传输回路



分岐



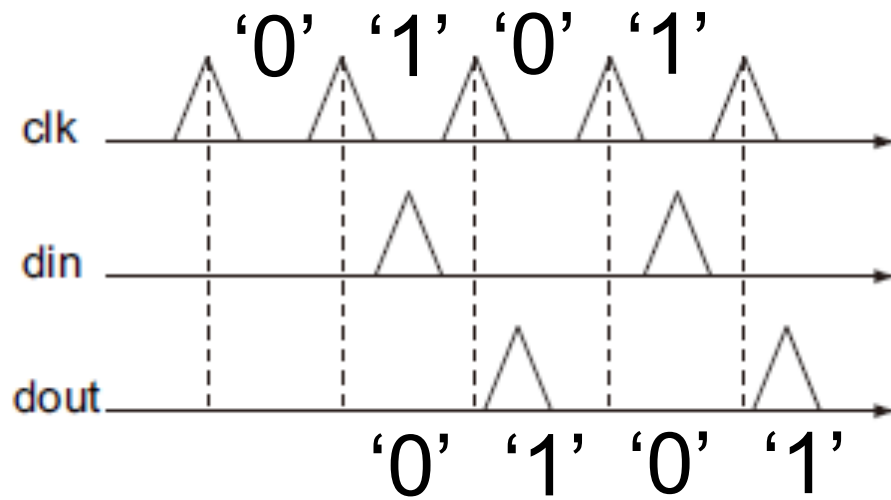
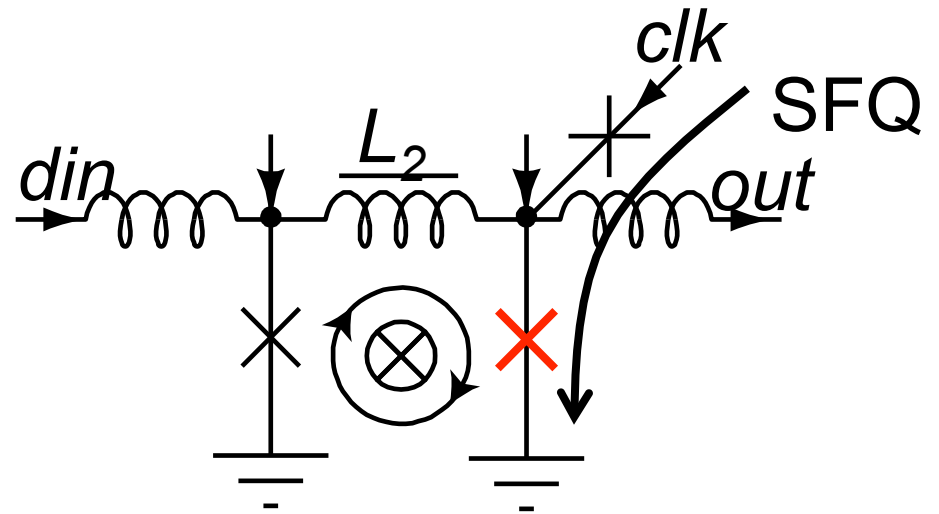
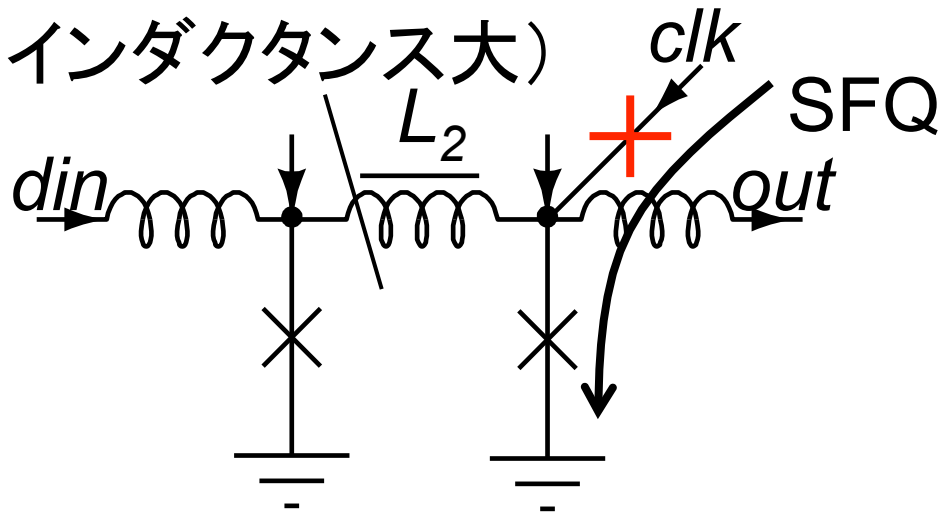
方向性結合



合流

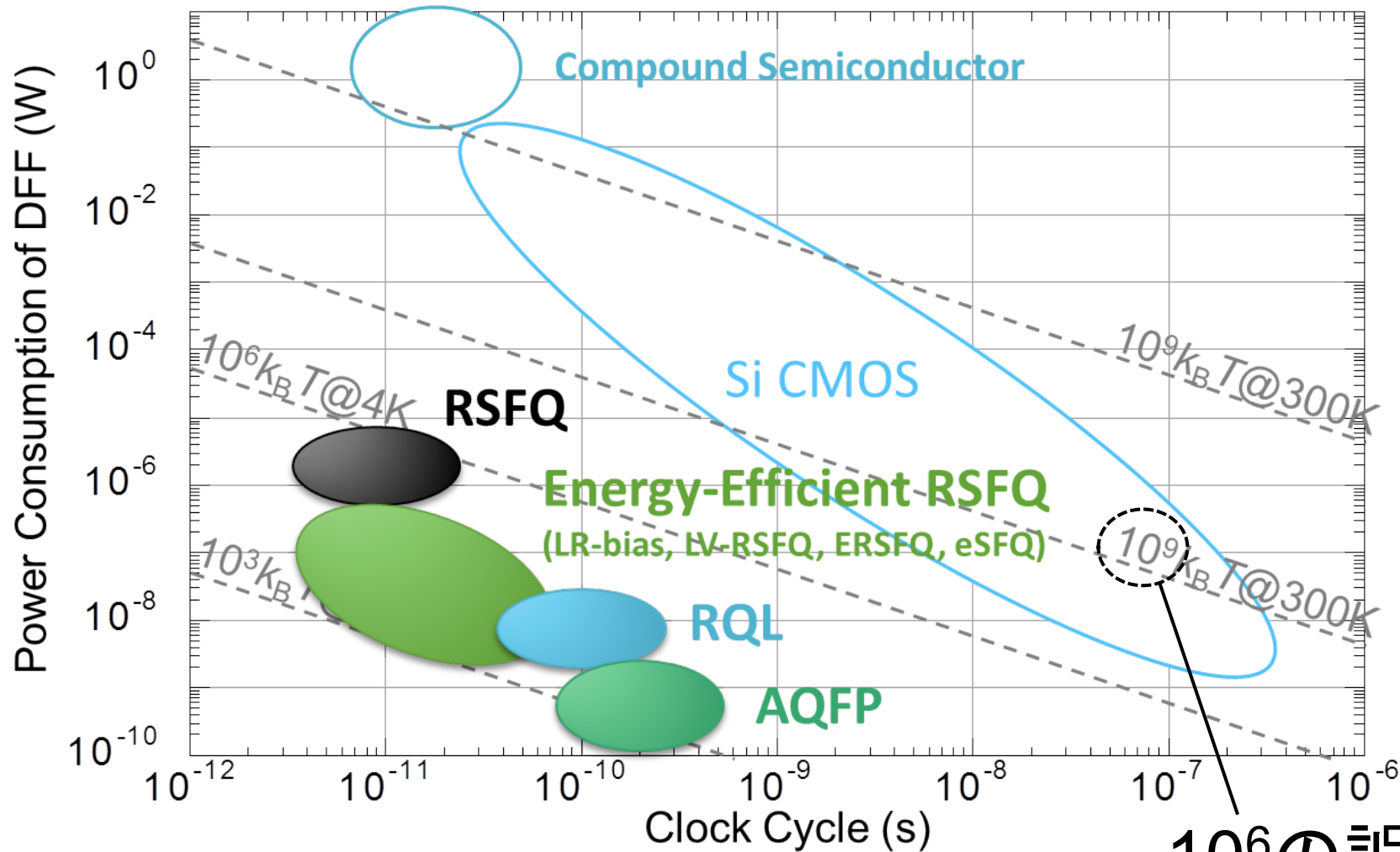
# SFQ論理ゲートの例

SFQ保持ループ  
(インダクタンス大)



DFF  
(Delay Flip-Flop)

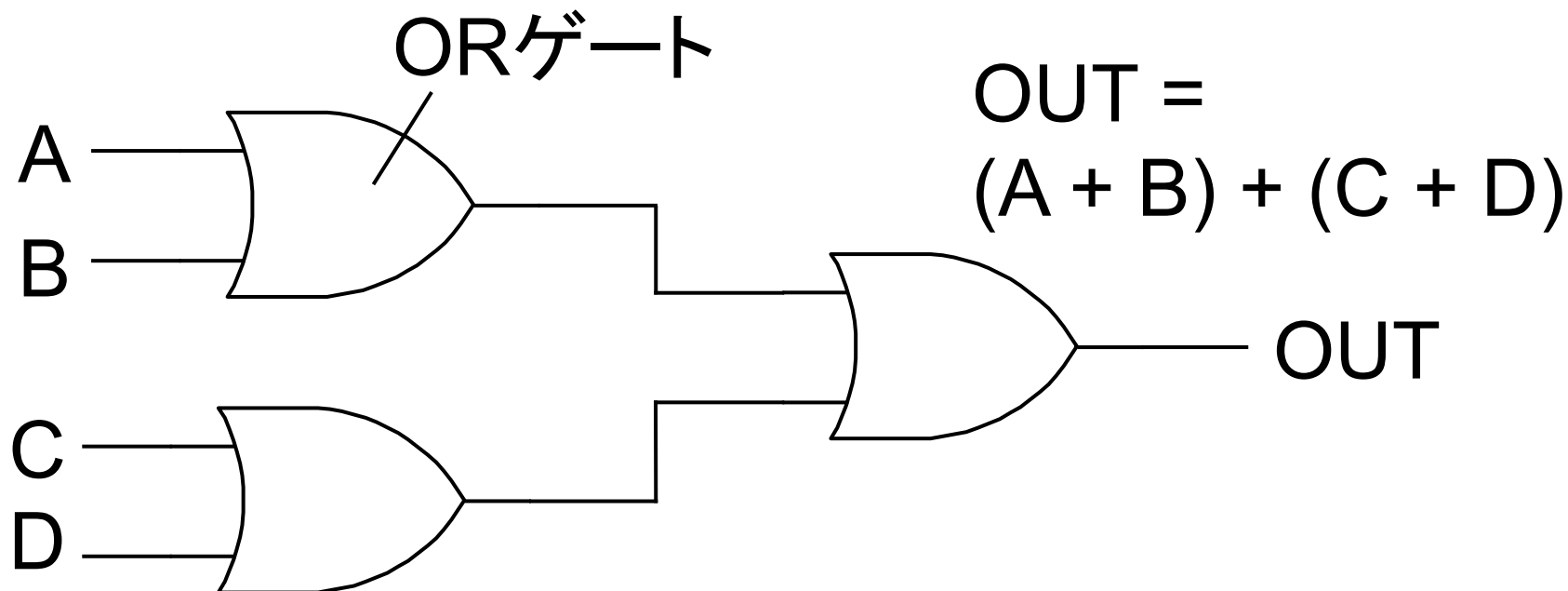
# 電力と遅延の他デバイスとの比較<sup>10</sup>



Courtesy of Prof. Tanaka (Nagoya Univ.)



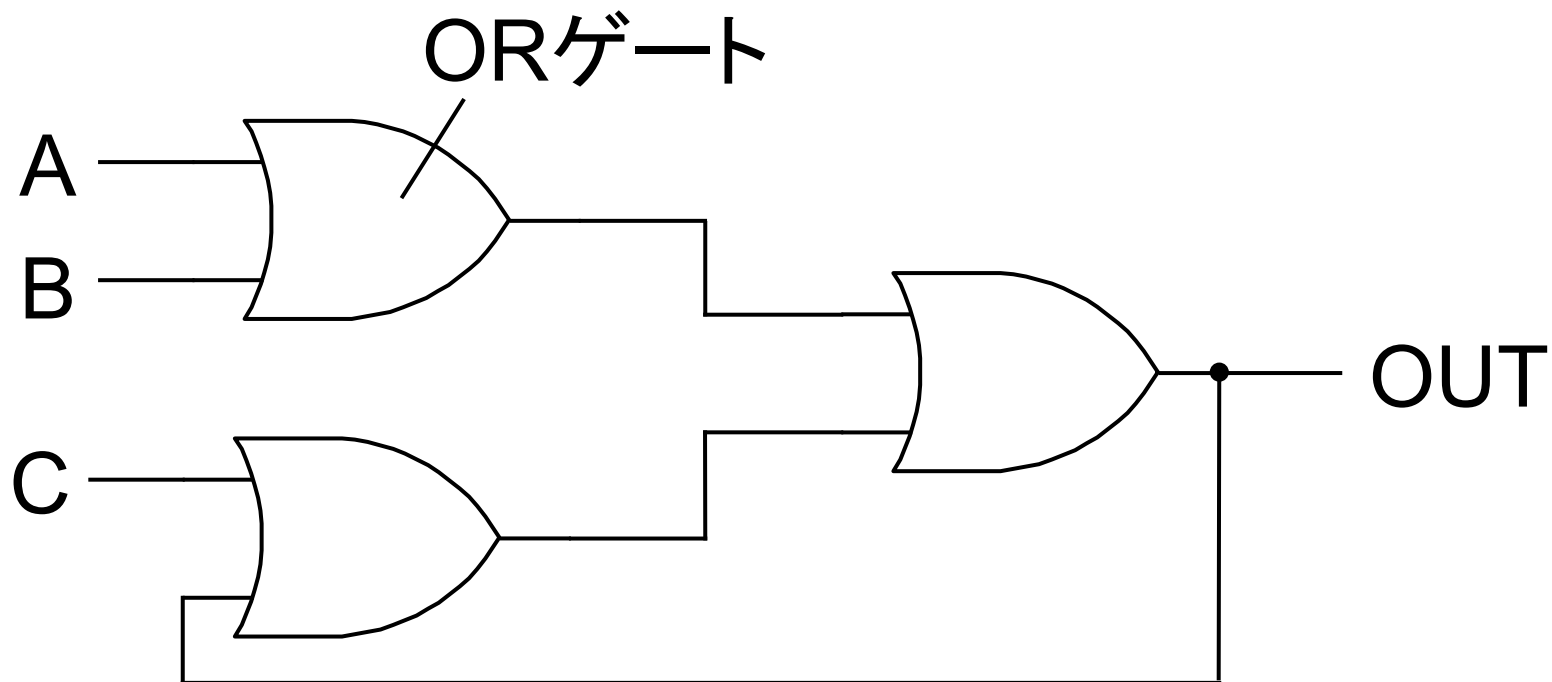
# SFQ回路の得意な回路



1ゲートの出力が得られれば  
即時に次のデータを入力可

⇒ 超高スループットのデジタル回路

# SFQ回路の苦手な回路



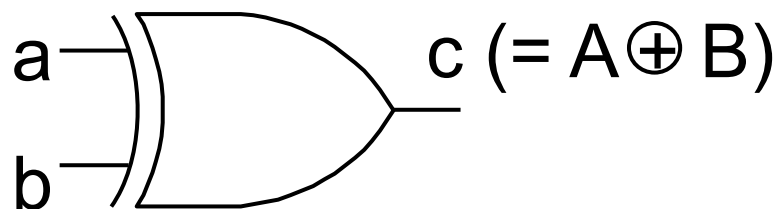
出力のフィードバックを待つ必要

⇒ スループットの低下

# SFQ回路の得意な計算

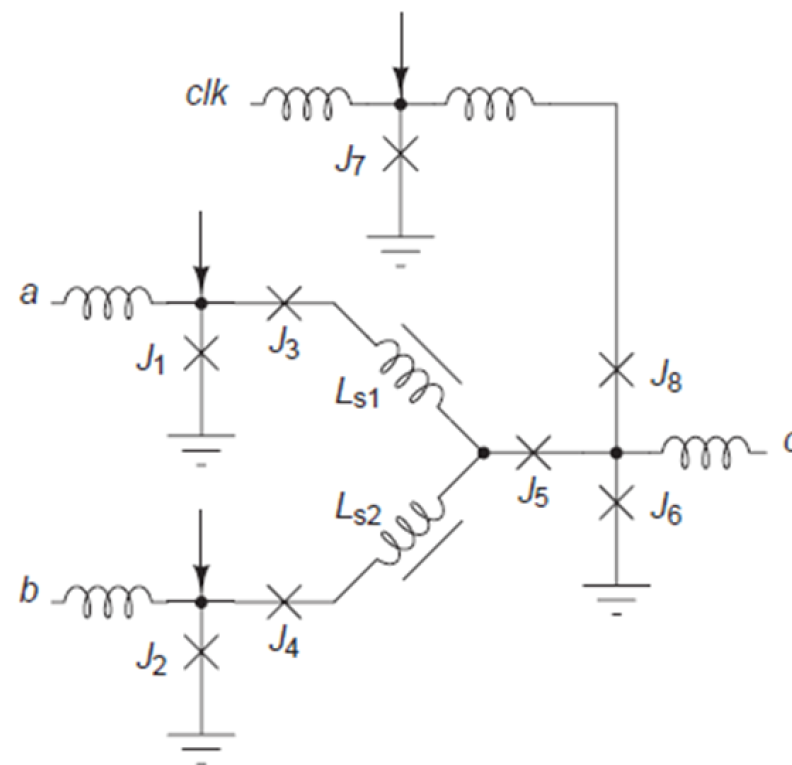
排他的論理和ゲート  
(Exclusive-OR)

$$a \oplus b = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$$



真理値表

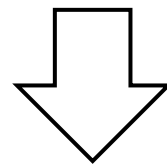
A	B	OUT
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



# SFQ回路は天文分野向き？

天文分野の解析回路：

- データは1次元1方向  
(フィードバック不要)
- 排他的論理和計算が得意  
(1ゲートでの相関計算可)
- 天文分野は  
冷却を厭わない



SFQ回路の有望な応用先

# 内容

- 超伝導回路技術と、天文分野応用から見たその特徴
- 天文分野に使える(かもしれない)回路
  - ◆ 乱数生成回路
  - ◆ FFTプロセッサ
  - ◆ 自己相関器



# 乱数の種類

乱数: 周期、相関のない数値列  
シミュレーションや計測器の校正に利用

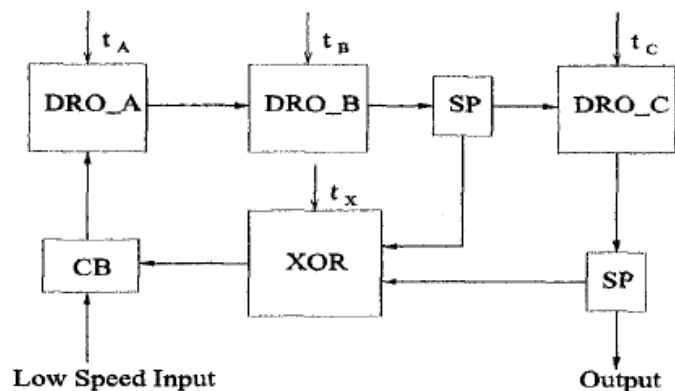
## 疑似乱数

- 計算アルゴリズム使用
- 周期あり
- 汎用計算機で生成可

## 物理乱数

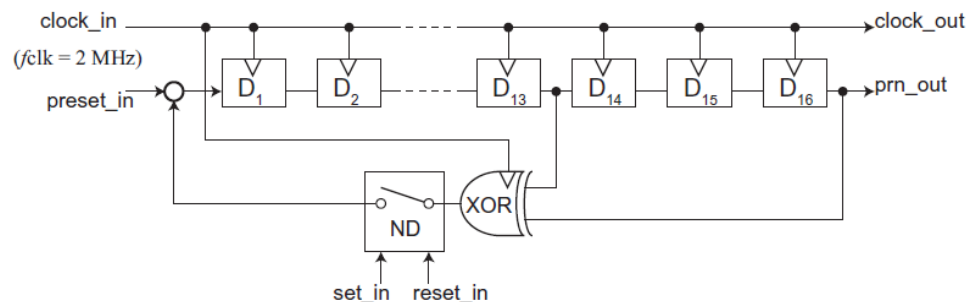
- ランダムな自然現象を利用
- 周期なし
- 専用素子が必要

# SFQ疑似乱数生成器(専用回路)<sup>17</sup>



50 GHz疑似乱数生成

Zhou et al., IEEE TAS 11  
(2001) 617.



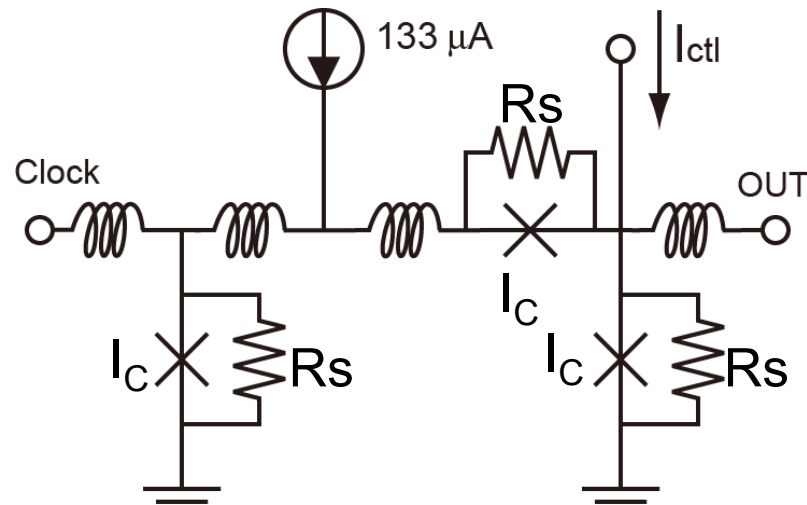
量子電圧ノイズ源に使用

Yamada et al., Physica C  
518 (2015) 85.

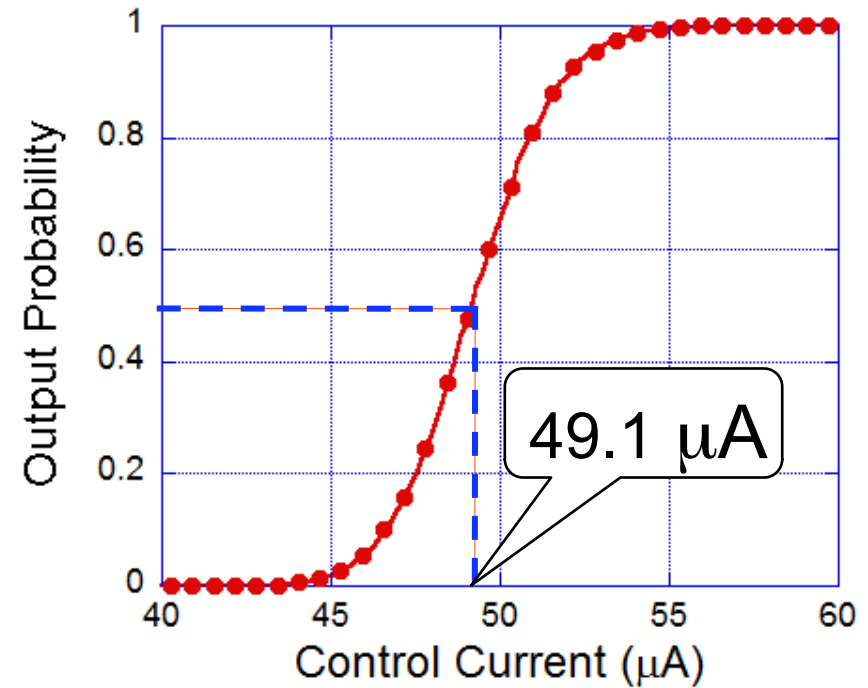
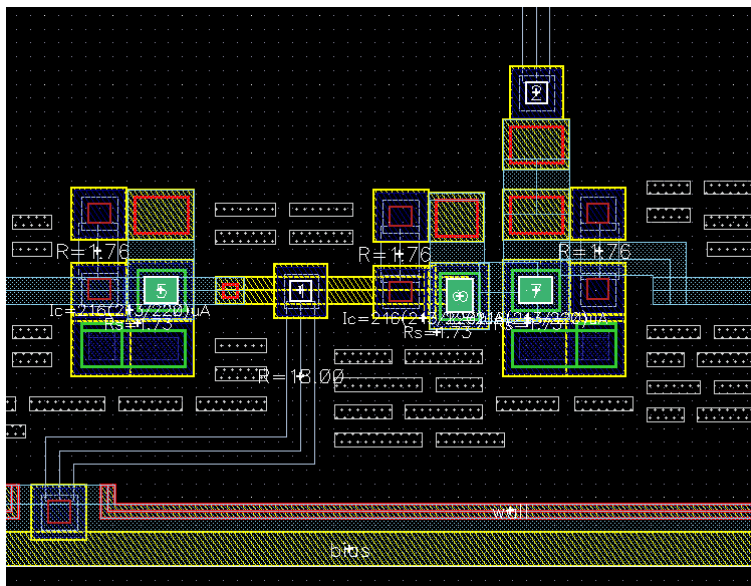
複数出力を用いた生成レートの向上  
(3 outputs/clockまで実証)

武藤他, IEICE秋季大会, 2015年9月.

# SFQ物理乱数生成器

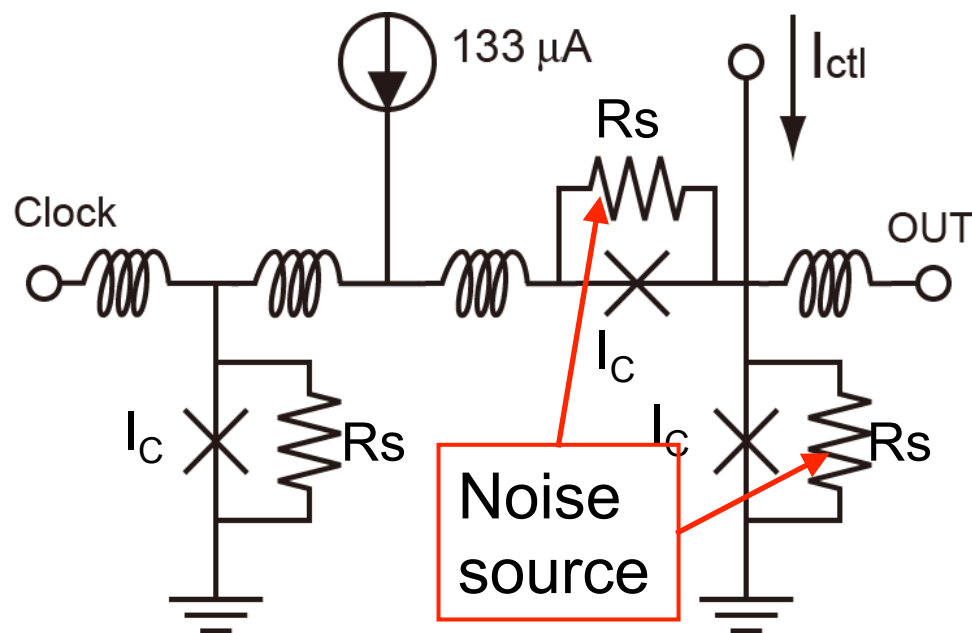


$$I_C = 216 \mu\text{A}, R_s = 1.73 \Omega, L = 2.52 \text{ pH}$$



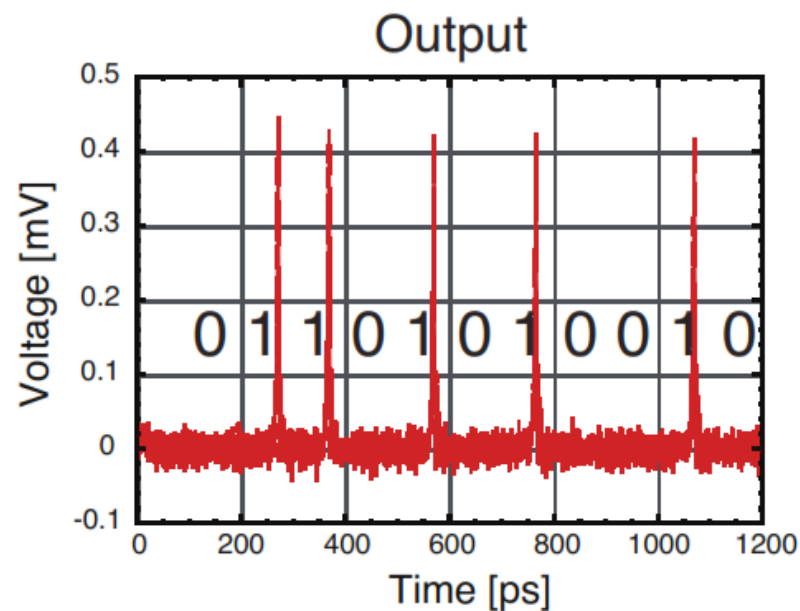
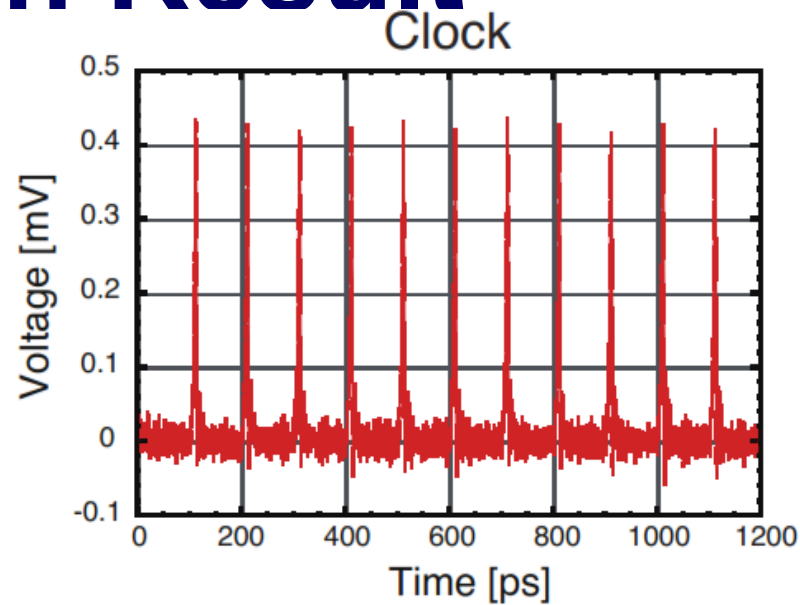
Yamanashi et al., IEEE  
TAS 19 (2009) 630.

# Simulation Result



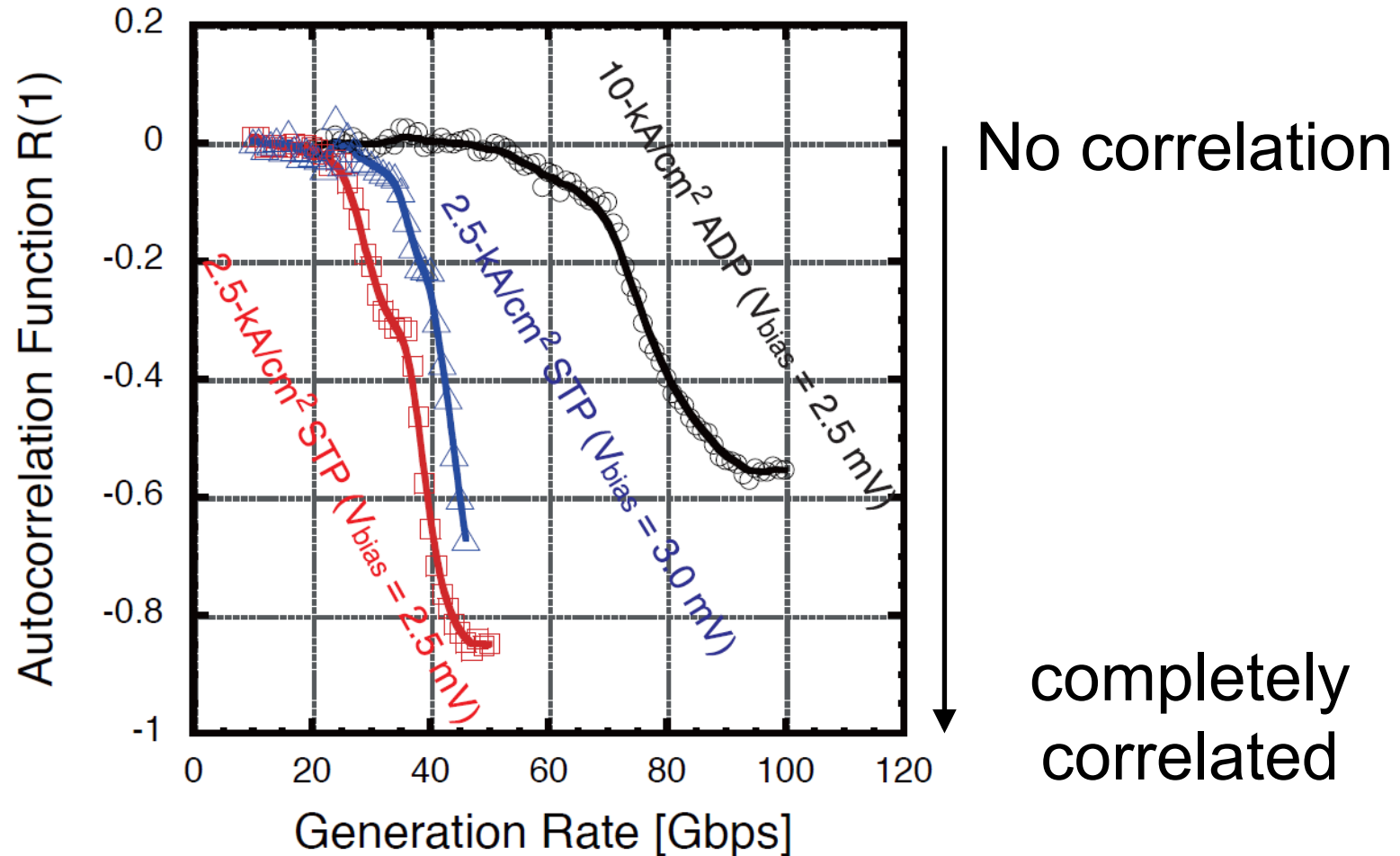
Generation rate  
> 20 Gbps

SRL 2.5 kA/cm<sup>2</sup> Nb  
Standard process



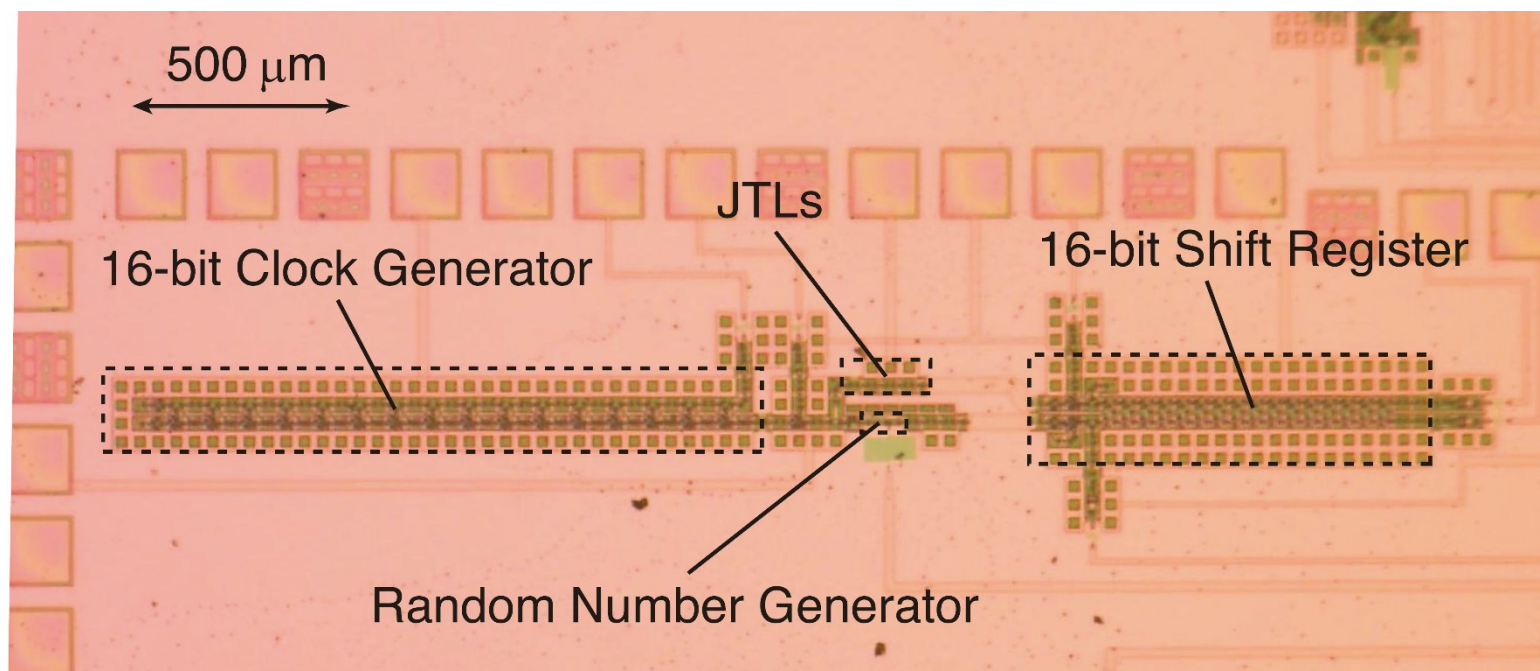
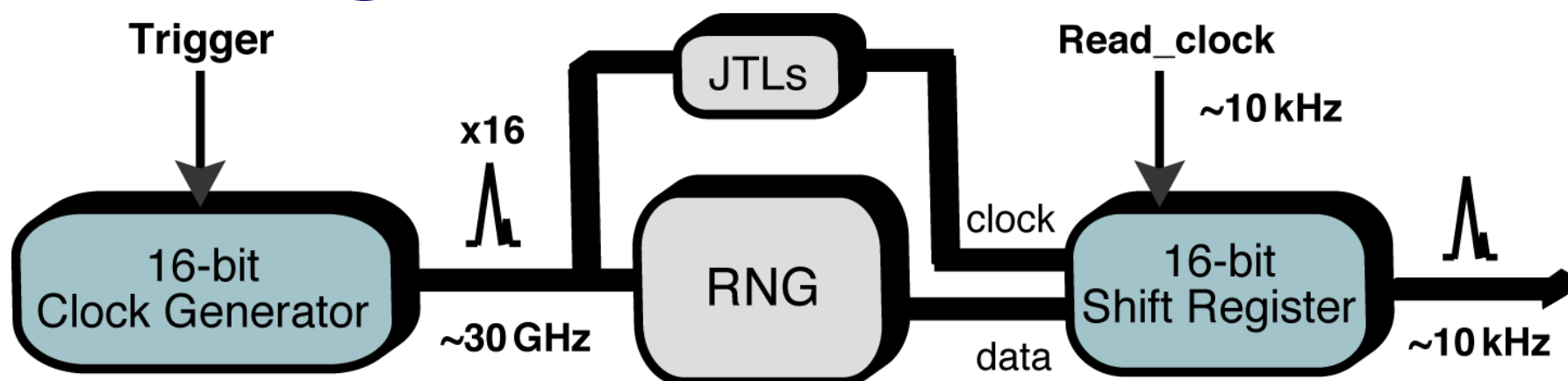
# Simulated Autocorrelation versus Generation Rate

20



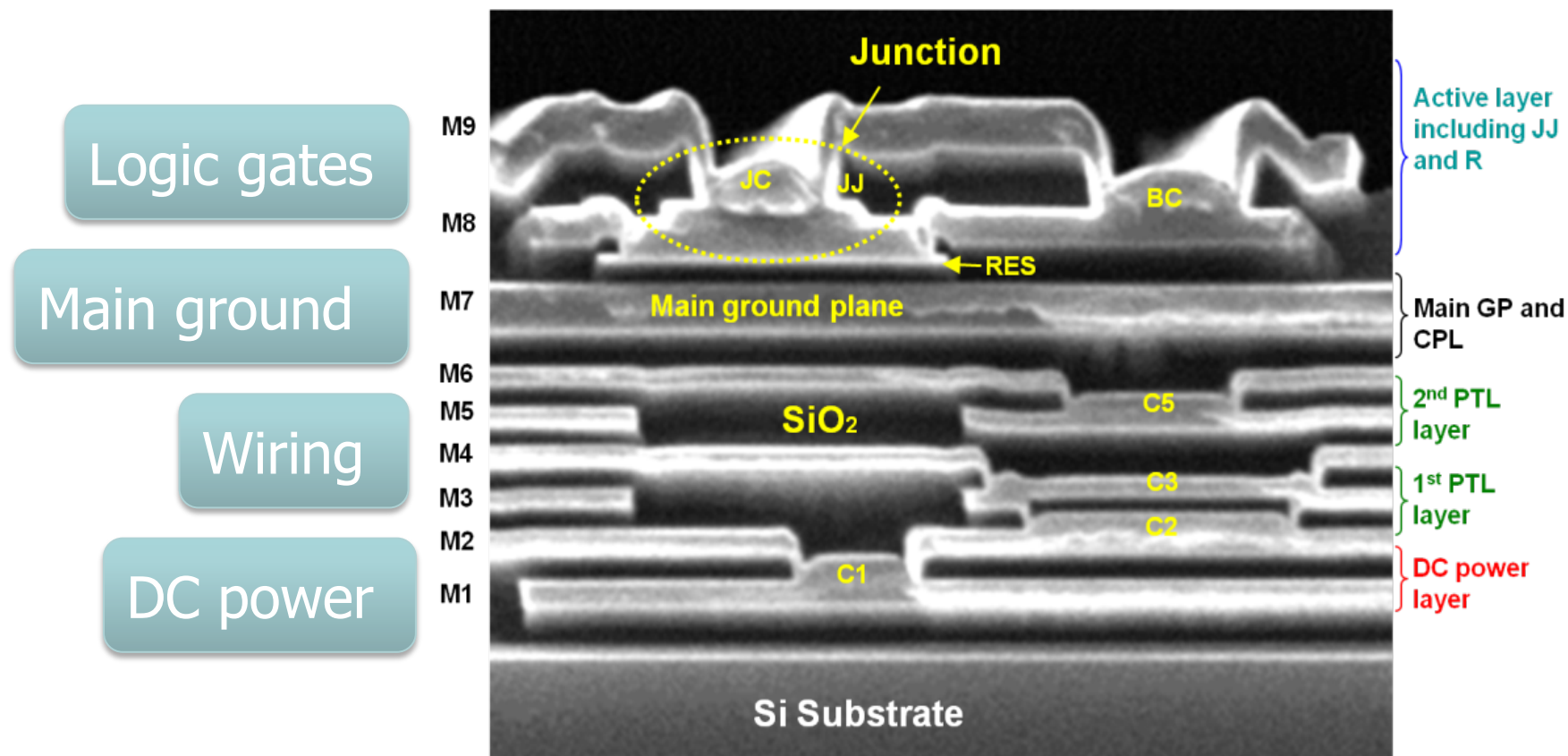
Maximum generation rate: ~25 Gbps  
(2.5 kA/cm<sup>2</sup> Nb Standard Process)

# High-Speed Test of RNG



# 回路作製プロセス

産総研Nbアドバンストプロセス (AIST-ADP)



超伝導配線層: Nb

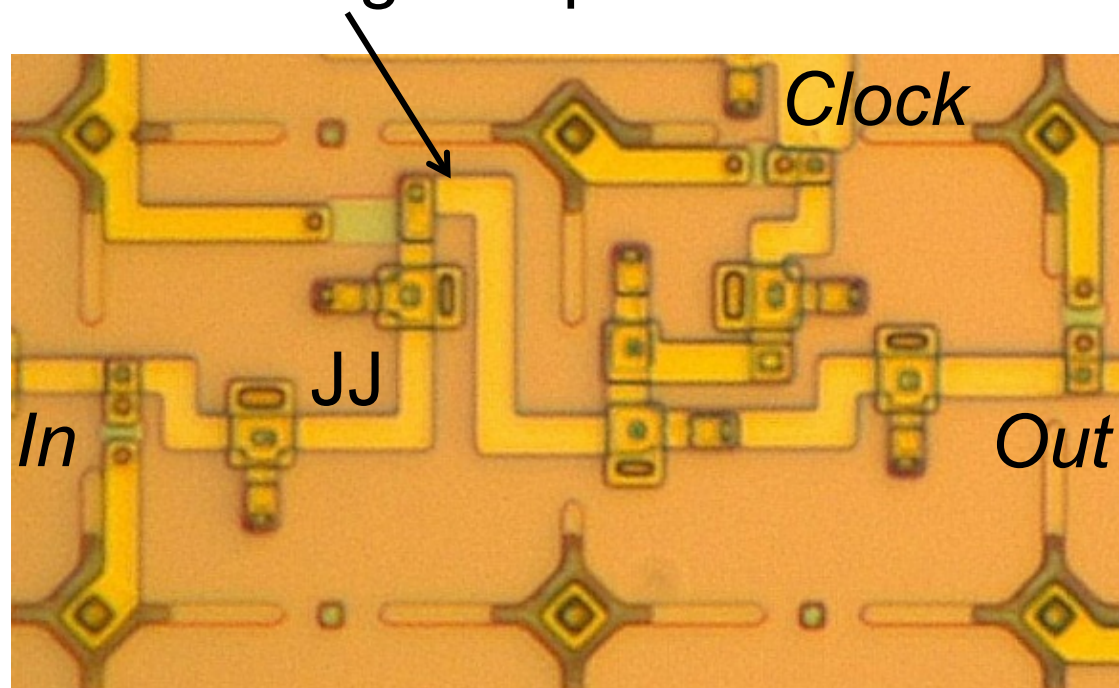
線間絶縁層: SiO<sub>2</sub>, 抵抗層: Mo

CRAVITY  
AIST

YNU

# AIST-ADP

Data storage loop



最小線幅:  $1 \mu\text{m}$

最小接合面積:  
 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$

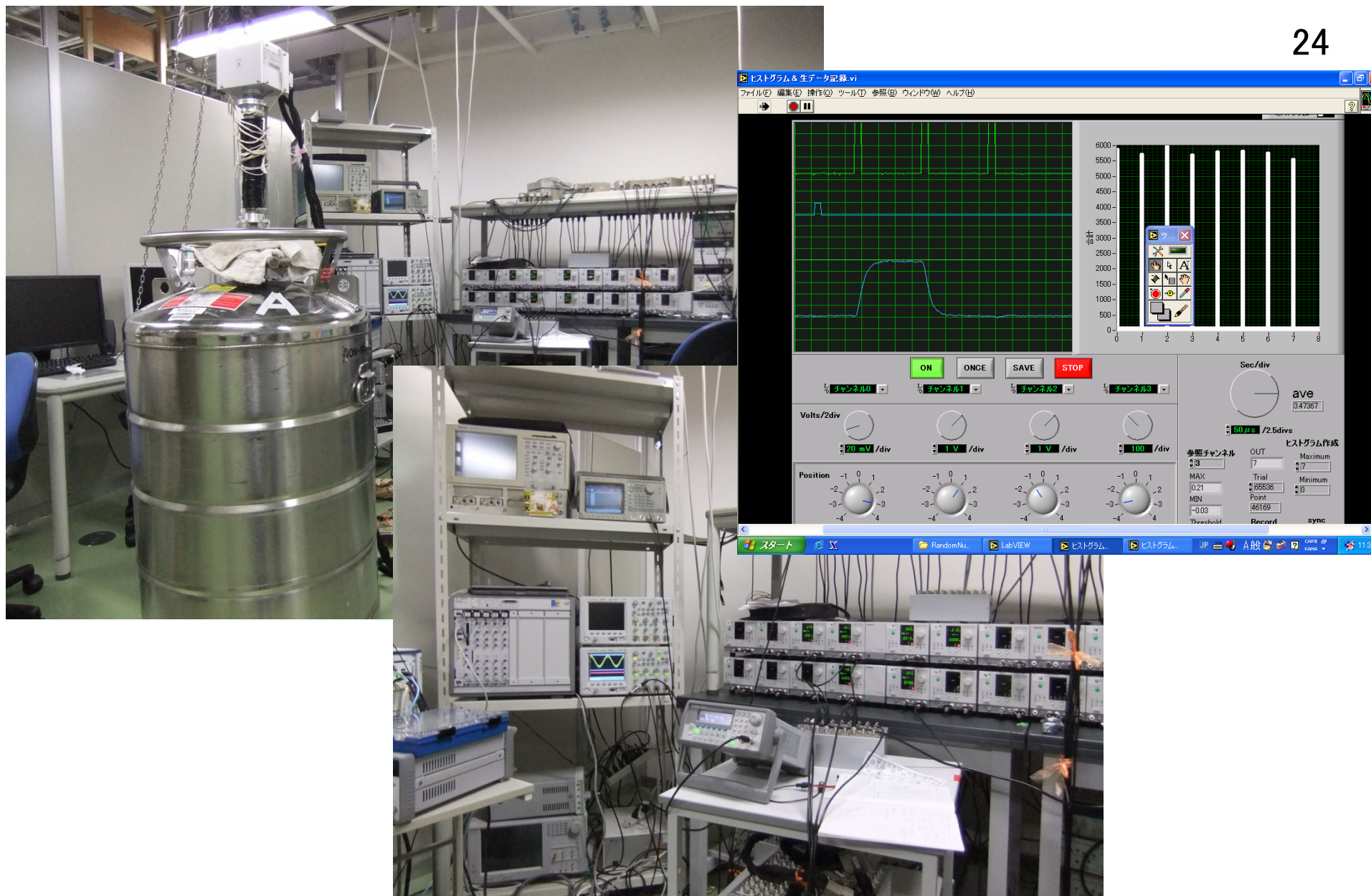
**CRAVITY**  
AIST

← 30  $\mu\text{m}$  →

AIST-ADPで試作した  
Delay Flip-Flop (DFF)の写真

**YNU**





Recorded random number: 3.2 Mbit

# Statistical Test Result

Statistical Test	p-value	Result
Frequency: Monobit	0.122325	OK
Block Frequency	0.739918	OK
Cumulative Sums-Forward	0.035174	OK
Cumulative Sums-Reverse	0.122325	OK
Runs	0.17912	OK
Spectral DFT	0.911413	OK
Non-Overlapping Templates	0.066882	OK
Overlapping Templates	0.035174	OK
Universal	----	----
Approximate Entropy	0.739918	OK
Random Excursions	----	----
Random Excursions Variant	----	----
Linear Complexity	0.213309	OK
Serial	0.739918	OK

NIST 800-22:  
乱数検定ツールの代表

13/16のテストに合格

3つのテストは行えず  
(取得データ不足)

課題は動作安定化

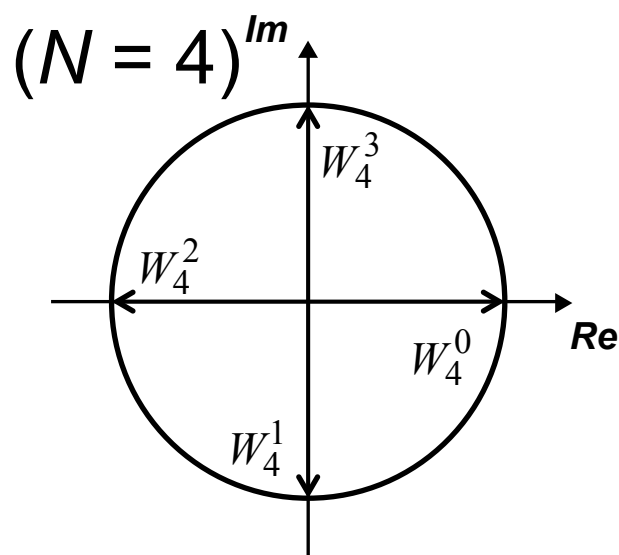
# 内容

- 超伝導回路技術と、天文分野応用から見たその特徴
- 天文分野に使える(かもしれない)回路
  - ◆ 乱数生成回路
  - ◆ FFTプロセッサ
  - ◆ 自己相関器

# FFT

## Discrete Fourier Transform (DFT)

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi nk}{N}) \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$



$$W_N^{nk} = \exp(-j \frac{2\pi nk}{N}) = \cos(-j \frac{2\pi nk}{N}) + j \sin(-j \frac{2\pi nk}{N})$$



**Twiddle  
factor**

$$W_4^2 = -W_4^0$$

$$W_4^3 = -W_4^1$$

FFT

Twiddle factor in  
z-plane

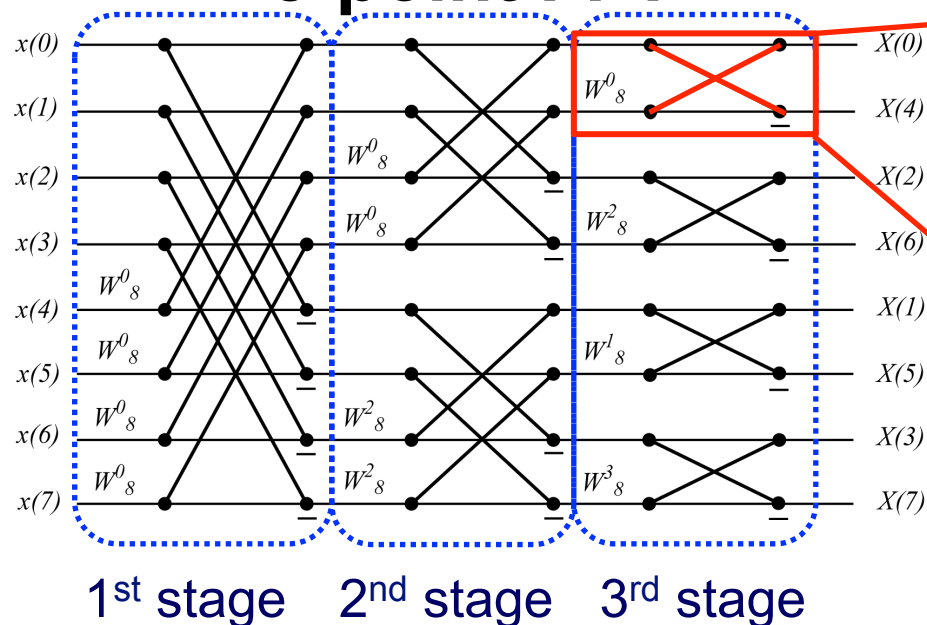
Nサンプル点フーリエ変換の計算量:

DFT:  $O(N^2)$

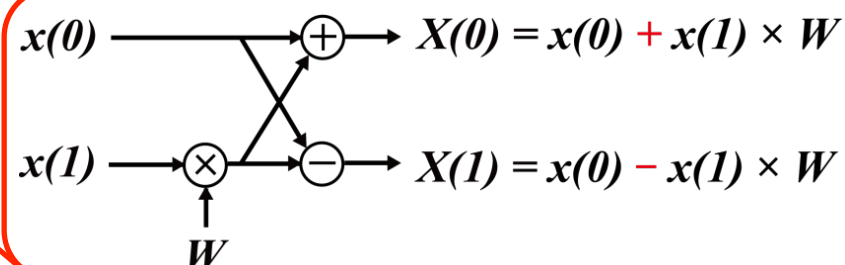
FFT:  $O(N \log N)$

# FFTプロセッサの構成

## 8-point FFT

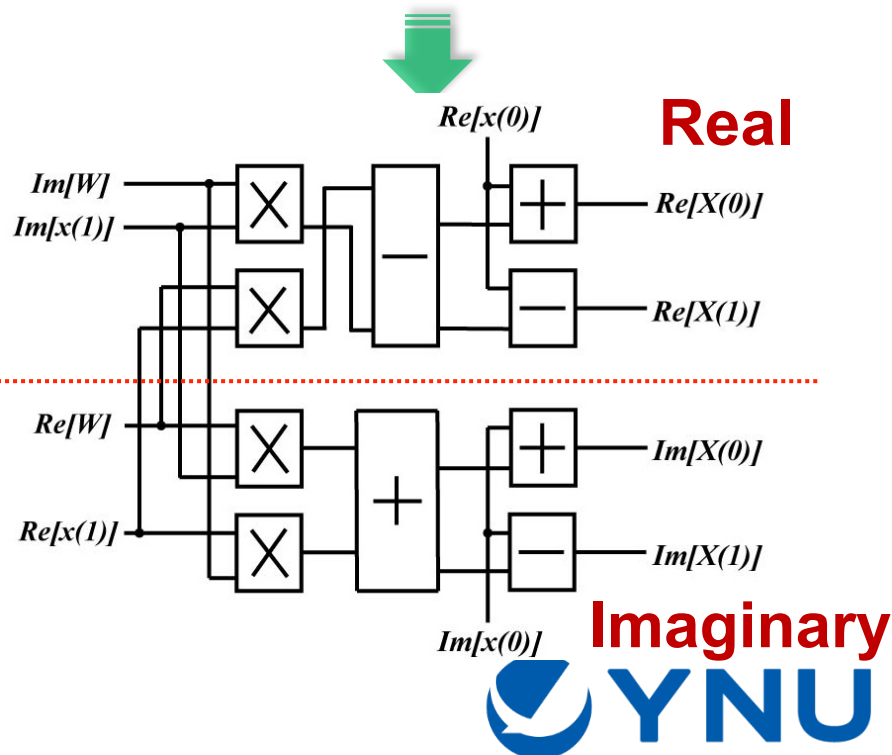


## Butterfly operation

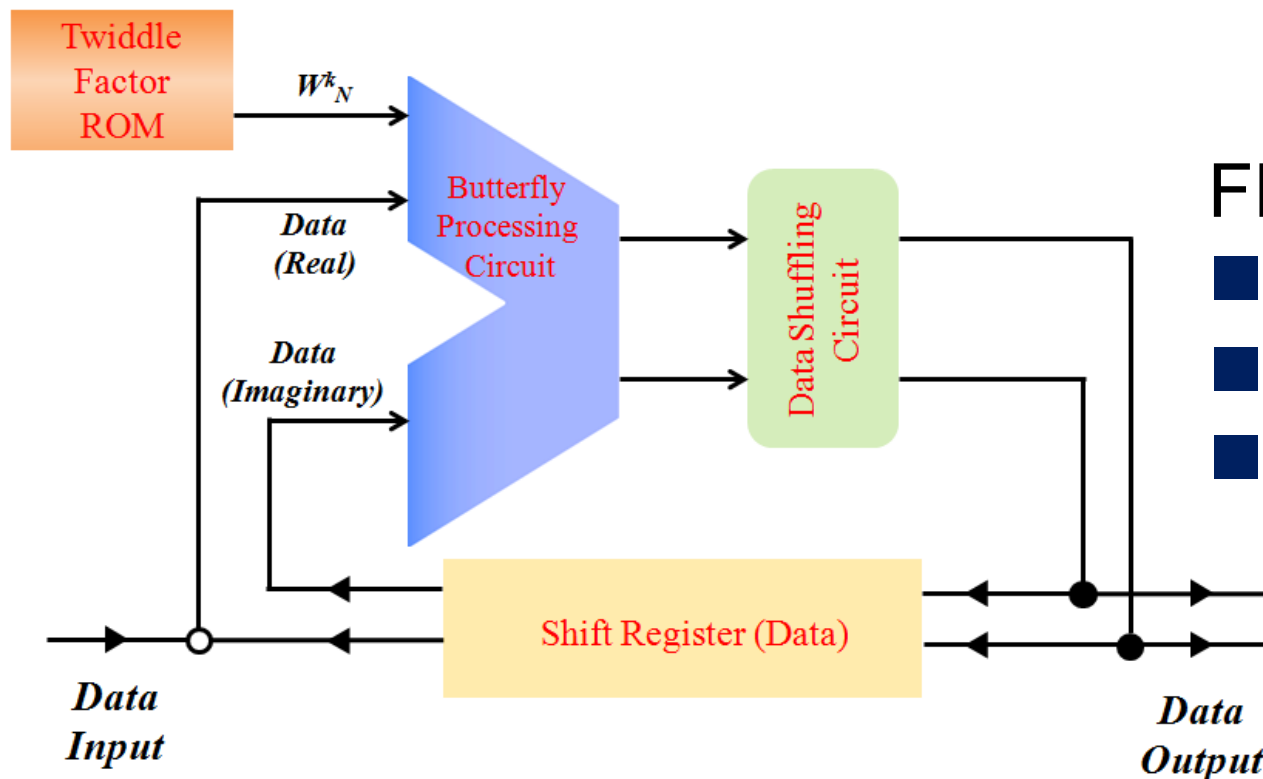


FFTプロセッサ:

- バタフライユニット
- データシャッフリング
- 回転因子ROM



# SFQ FFTプロセッサ

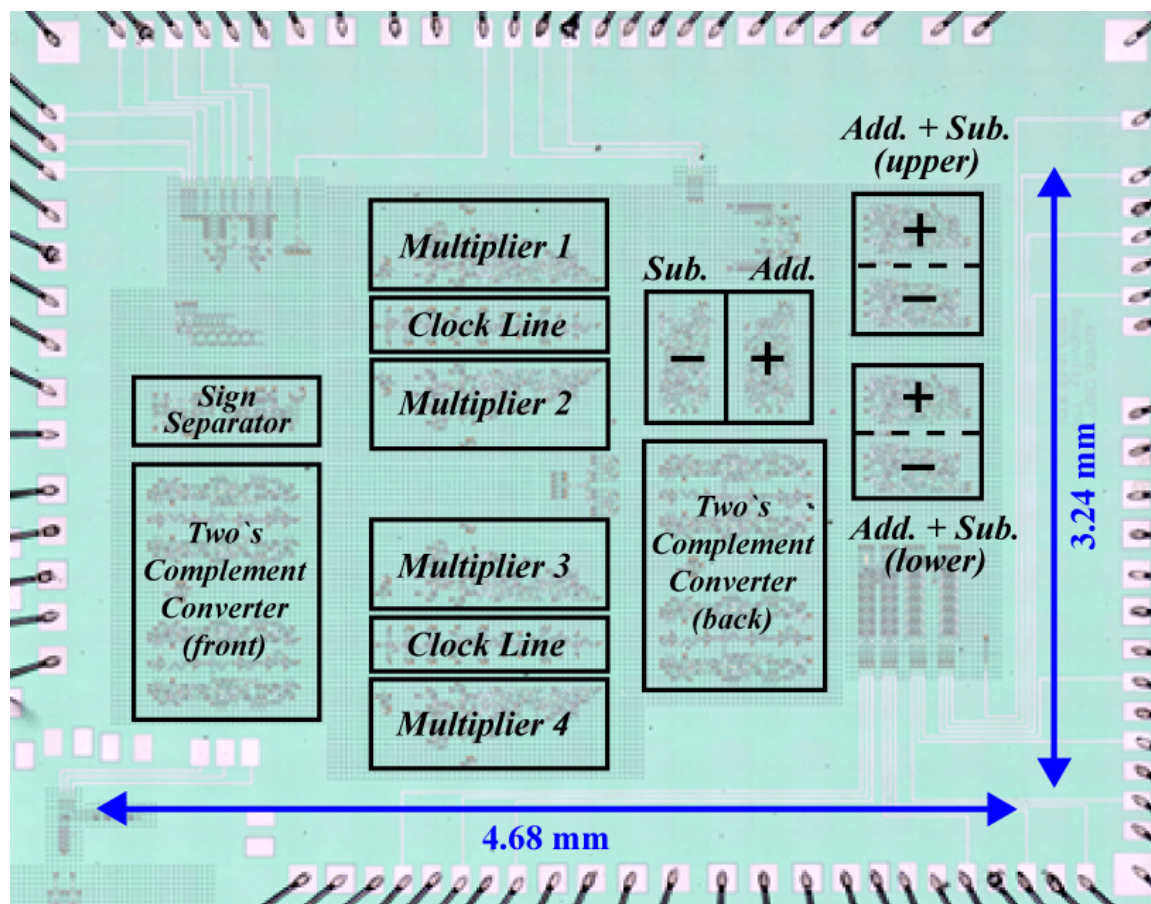


FFTプロセッサ:

- バタフライユニット
- データシャッフリング
- 回転因子ROM

- Estimated calculation time of 32-bit SFQ FFT processors for 1024-point FFT: **6.2  $\mu\text{s}$**  at 50 GHz
- Calculation time of FFT processors using CMOS FPGA: **62.95  $\mu\text{s}$**

# 4-bit バタフライユニット



Process:  
AIST 10 kA/cm<sup>2</sup> Nb  
Advanced Process

Number of JJs: 8349

Bias Current: 1.06 A

Target Frequency:  
50 GHz

# バタフライユニット測定の例

## Data pattern 1

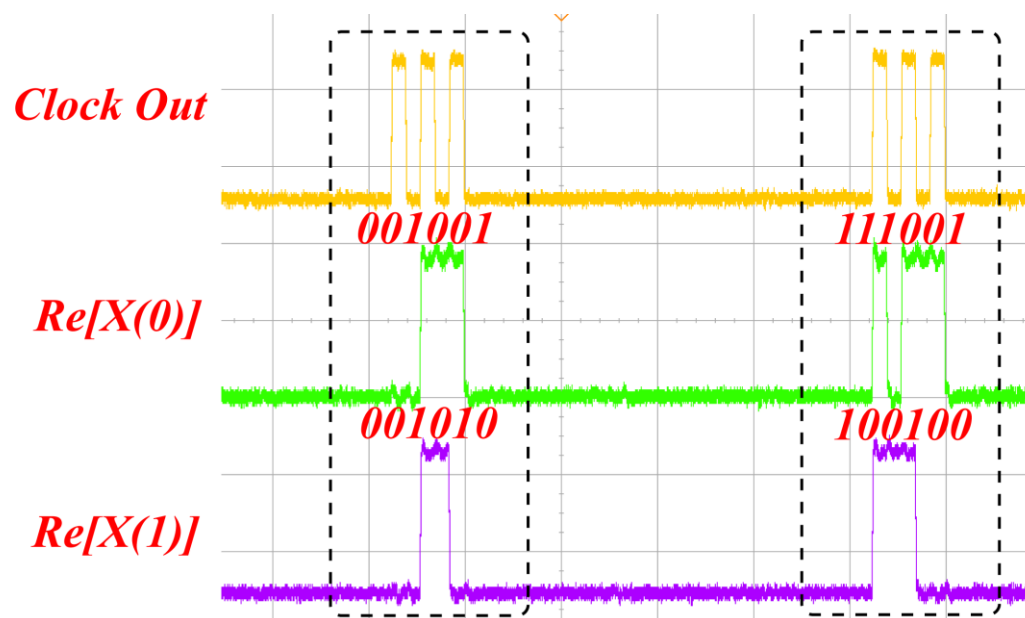
$\text{Re}[x(0)] = 0111$ ,  $\text{Im}[x(0)] = 1101$ ,  
 $\text{Re}[x(1)] = 1011$ ,  $\text{Im}[x(1)] = 1111$ ,  
 $\text{Re}[W] = 1101$ ,  $\text{Im}[W] = 1001$

$\text{Re}[X(0)] = \underline{100100}$ ,  
 $\text{Re}[X(1)] = \underline{010100}$

## Data pattern 2

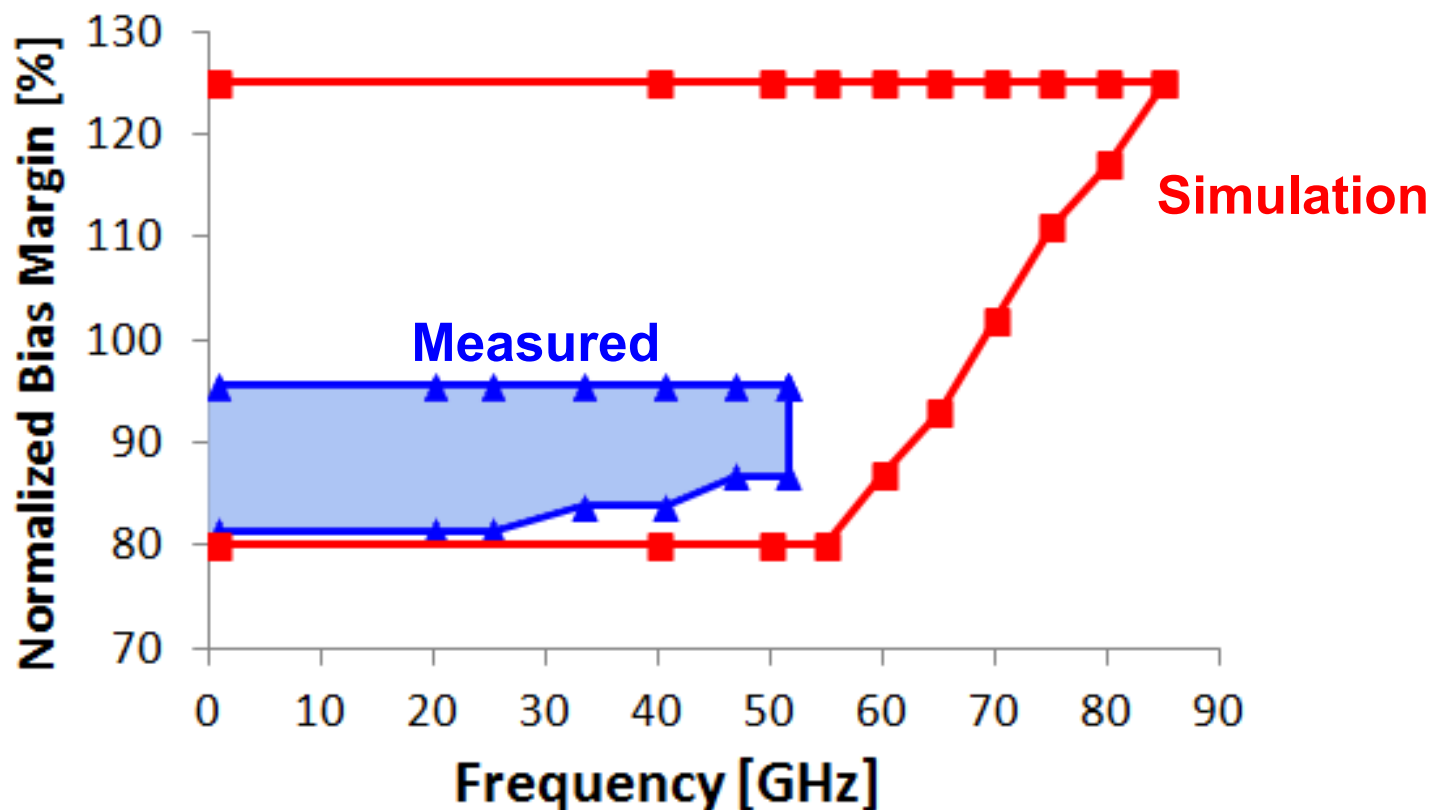
$\text{Re}[x(0)] = 0110$ ,  $\text{Im}[x(0)] = 1010$ ,  
 $\text{Re}[x(1)] = 1011$ ,  $\text{Im}[x(1)] = 1100$ ,  
 $\text{Re}[W] = 1001$ ,  $\text{Im}[W] = 1011$ ,

$\text{Re}[X(0)] = \underline{100111}$ ,  
 $\text{Re}[X(1)] = \underline{001001}$





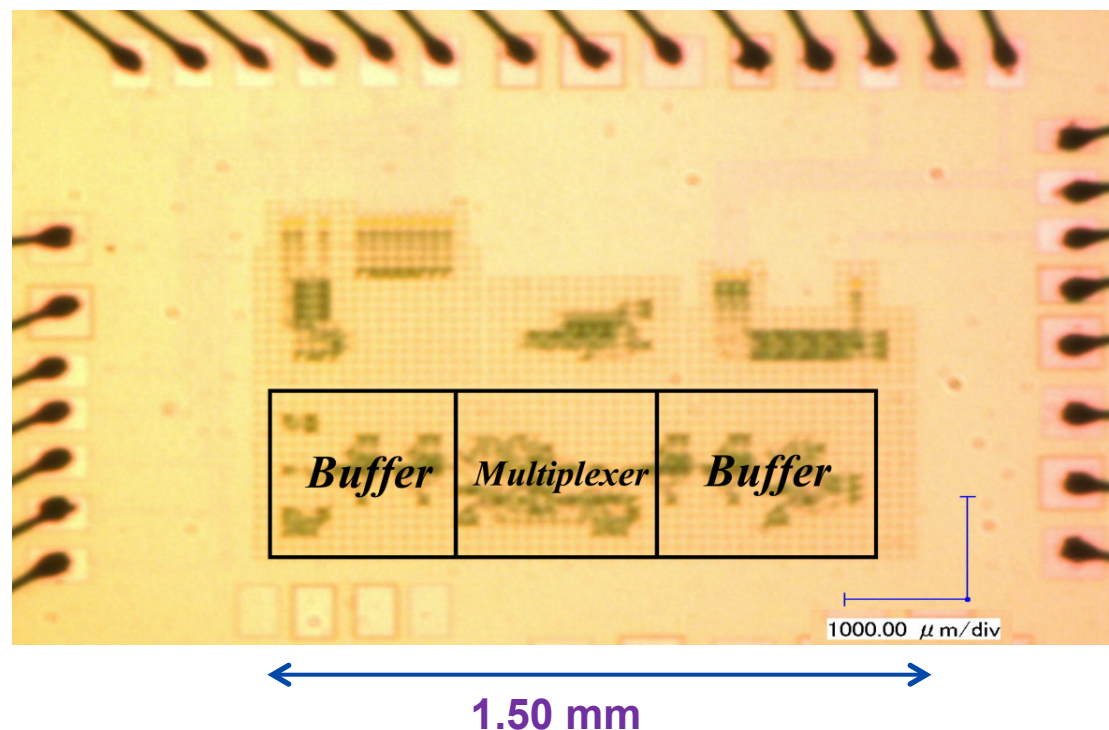
# 動作マージンの周波数依存



51.6 GHzの動作を確認

Sakashita et al., IEEE TAS  
25 (2015) 1301205.

# Data Shuffling Circuit



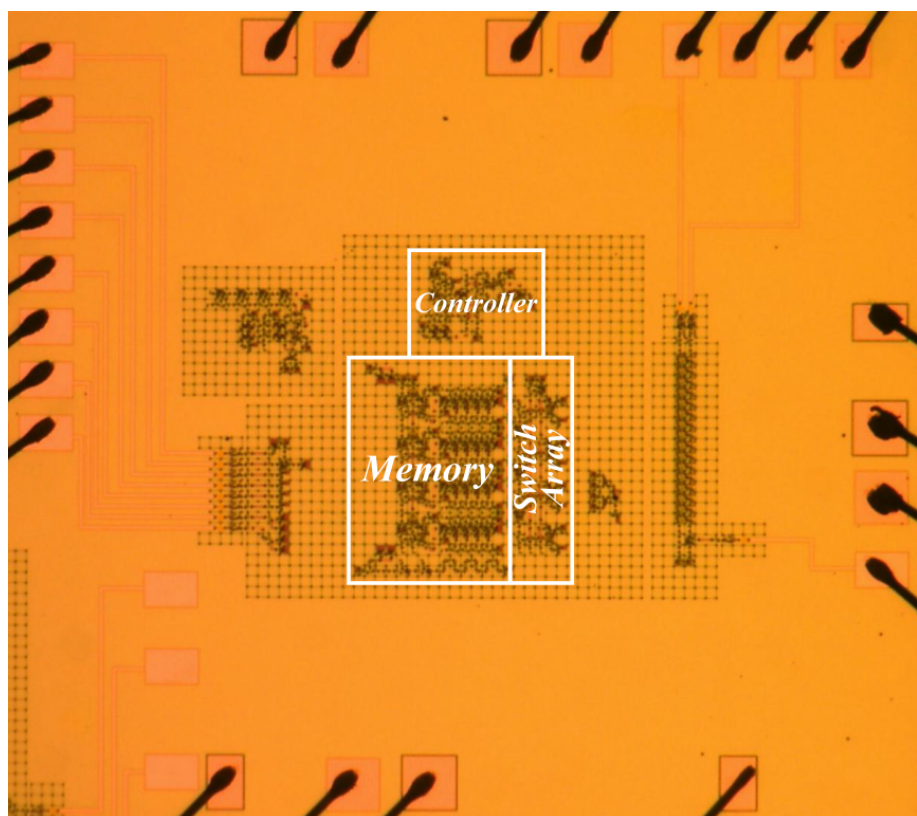
**CRAVITY**  
AIST

Process:  
AIST 10 kA/cm<sup>2</sup> Nb  
Advanced Process  
Number of JJs: 726  
Bias Current: 87.3 mA

- Used for 4-bit 8-point FFT
- Bias Margin: 80%~125%  
@50 GHz
- 59.5 GHz動作

**YNU**

# 4ビット回転因子メモリ



0.75 mm

0.90 mm

Process: AIST 10 kA/cm<sup>2</sup> Nb  
Advanced Process  
Number of JJs: 1028  
Bias Current: 109.7 mA

- For 4-bit 8-point FFT
- Bias Margin: 80%~125%  
@50 GHz
- 51.5 GHz動作実証

# CMOS FFT Processorとの比較<sup>35</sup>

	Technology	Bit-width	Power [mW]	Clock Frequency [GHz]	Energy per operation ( $\times 10^{-12}$ J)
[4]	0.11 $\mu\text{m}$	16	2.17	0.100	21.70
This study	1 $\mu\text{m}$ Nb ( $J_C = 10$ kA/cm <sup>2</sup> )	16	4.86	1.56	3.115

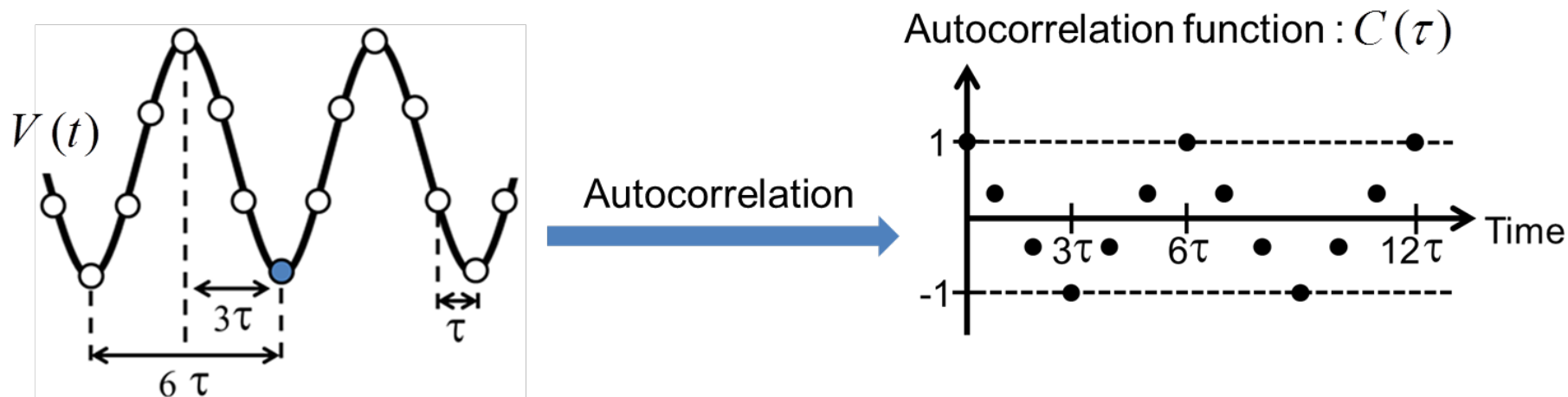
エネルギー効率で1桁の優位性  
(低電力SFQ回路を使えば2-3桁優位)

[4] M. Fonsenca et al., "Design of Pipelined Butterflies from Radix-2 FFT with Decimation in Time Algorithm Using Efficient Adder Compressors", IEEE Latin American Symposium on Circuit and Systems (LASCAS) 2011.

# 内容

- 超伝導回路技術と、天文分野応用から見たその特徴
- 天文分野に使える(かもしれない)回路
  - ◆ 乱数生成回路
  - ◆ FFTプロセッサ
  - ◆ 自己相関器

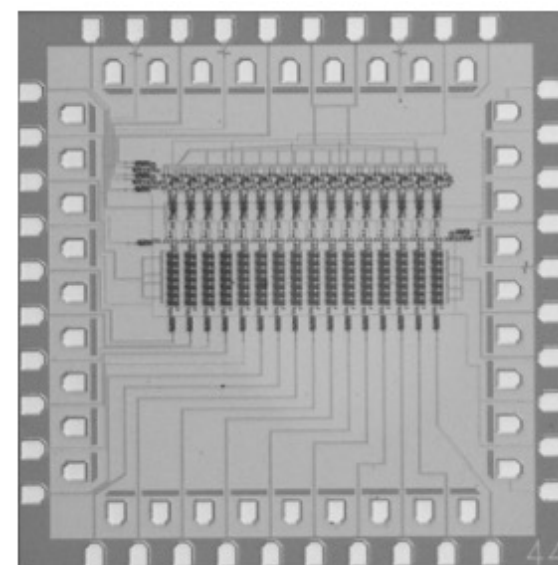
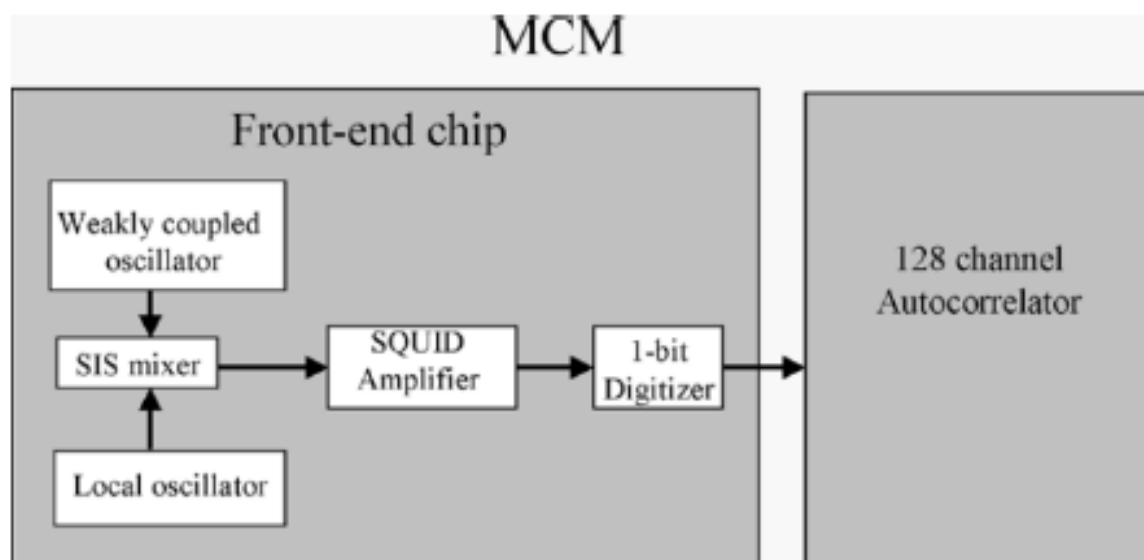
# 自己相関器



時間間隔 $n\tau$ 離れたデータ間の相関の計算

# ミリ波分光用SFQ自己相関器

SISミキサからの出力の自己相関を  
低温環境下で計算



16チャンネル  
自己相関器

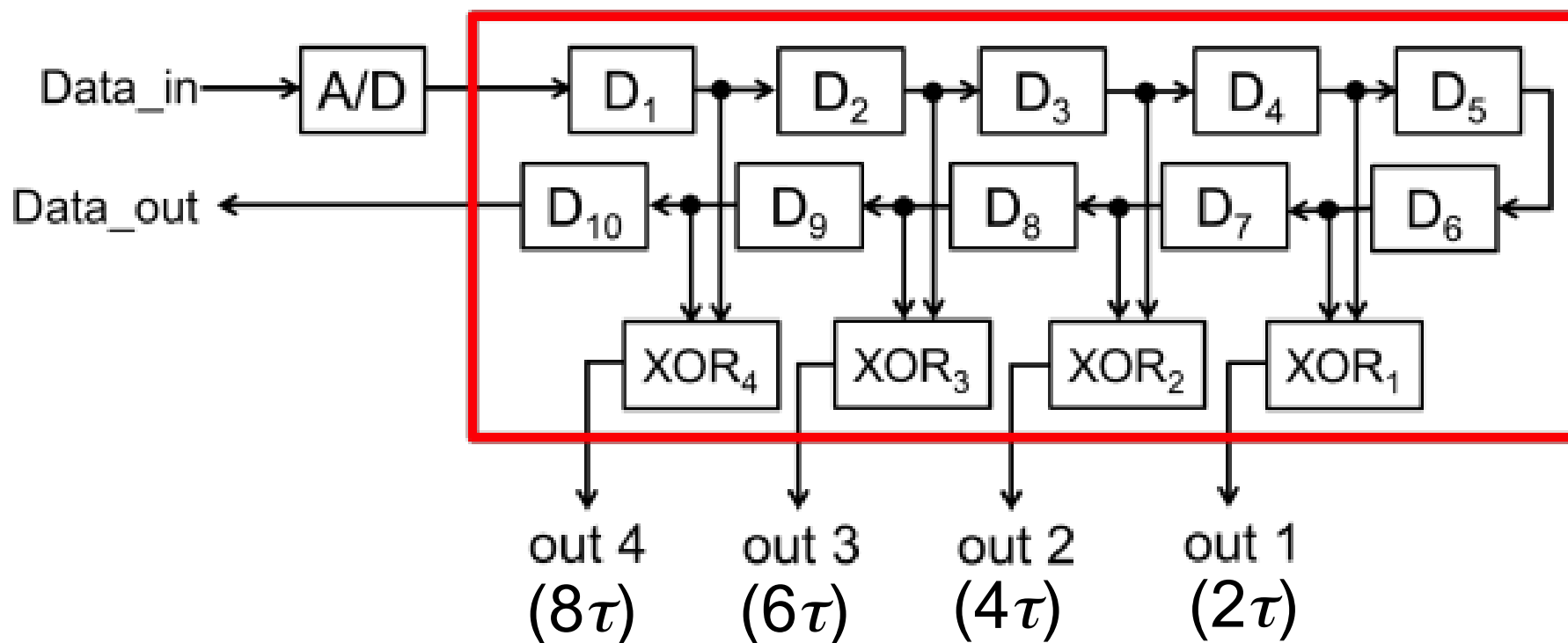
Vernik et al., IEEE TAS 15 (2005)  
419.

ADCの工夫で増幅器は不要？

# 1ビット自己相関器

Clock signal interval :  $\tau$

4-ch Autocorrelator



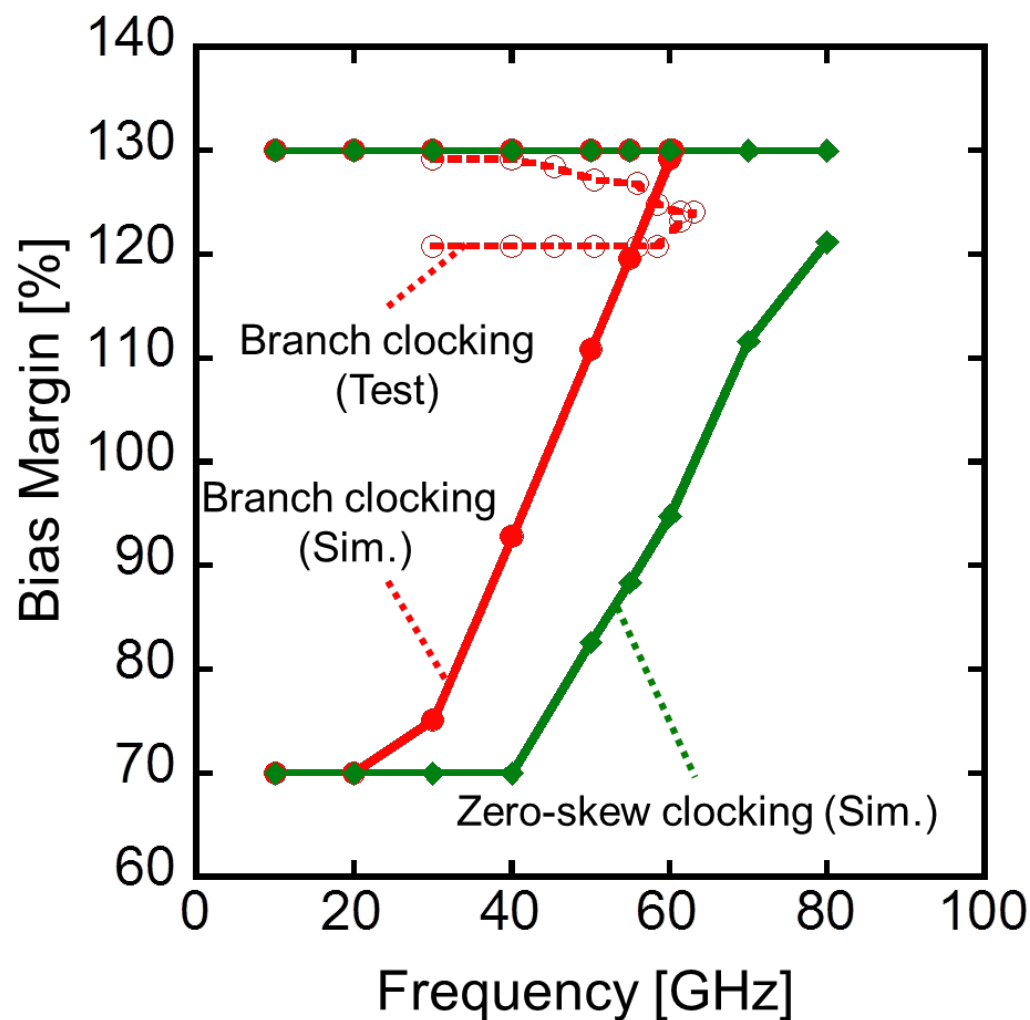
$D_n$  : Delay Flip-Flop



# 1-bit 自己相関器設計結果

ゼロスキュー  
クロッキング:  
高速だが  
回路規模大

ブランチ  
クロッキング:  
速度は劣るが  
回路規模小

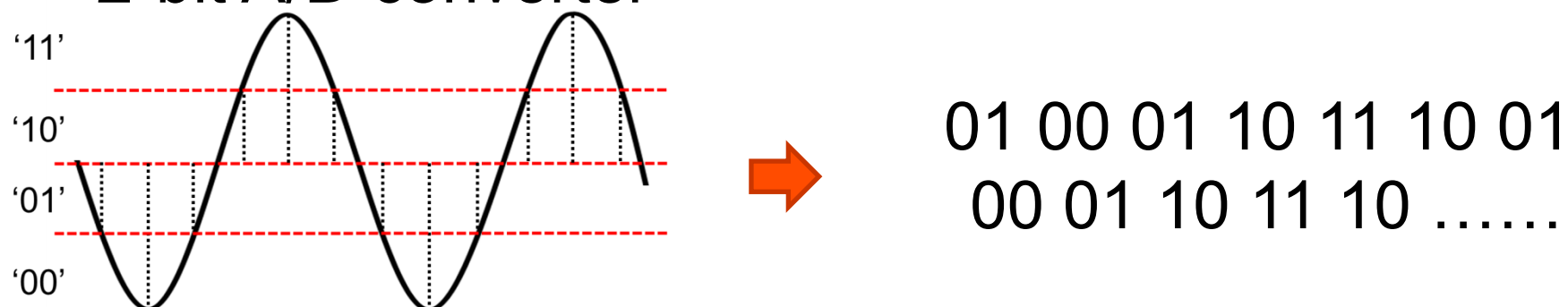


# 複数ビットADコンバータ

- 1-bit A/D converter



- 2-bit A/D converter



複数ビットADコンバータに  
対応できる自己相関器の設計

# 2-bit ADコンバータ用 自己相関器の設計

- The Karnaugh map of  $C_1$
- The Karnaugh map of  $C_0$

$y_1y_0 \backslash x_1x_0$	00	01	11	10
00	0	0	1	1
01	0	0	1	0
11	1	1	0	0
10	1	0	0	0

$y_1y_0 \backslash x_1x_0$	00	01	11	10
00	0	1	1	0
01	1	0	0	1
11	1	0	0	1
10	0	1	1	0



$$\begin{aligned}
 C_1 &= \overline{x_1} \overline{y_1} \overline{y_0} + \overline{x_1} y_1 y_0 + x_1 x_0 \overline{y_1} + \overline{x_1} x_0 y_1 \\
 &= \overline{x_1} \overline{y_1} (x_0 + y_0) + \overline{x_1} y_1 (x_0 + y_0)
 \end{aligned}$$

$$C_0 = x_0 \oplus y_0$$

# 2-bit ADコンバータ用 自己相関器の設計

43

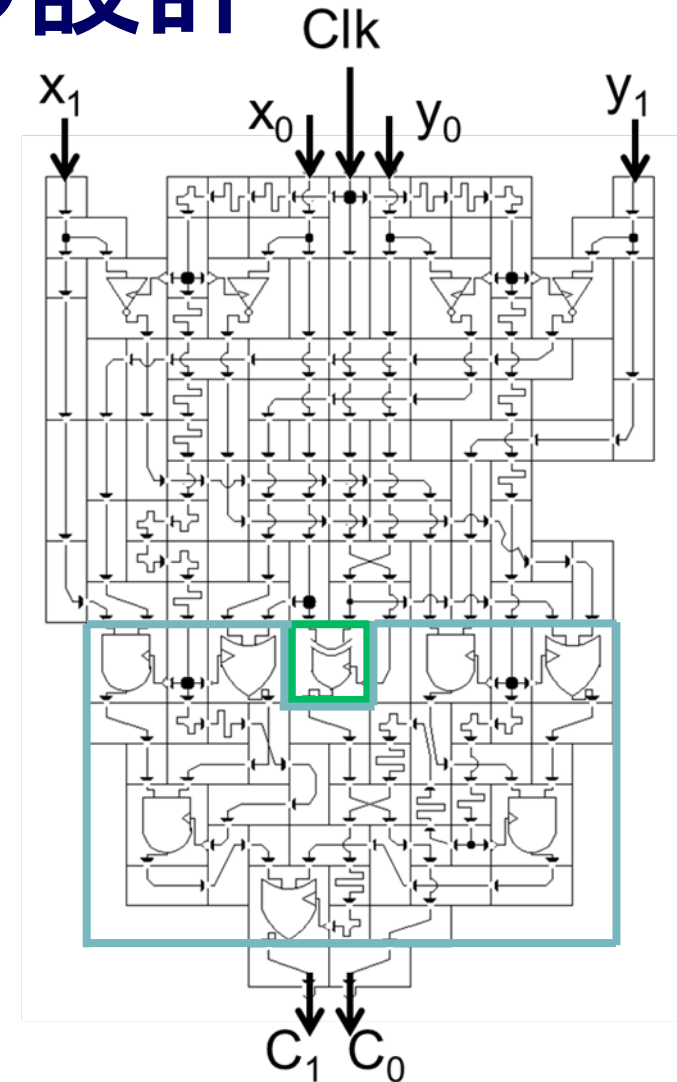
$$\begin{aligned} C_1 &= \overline{x_1 y_1} y_0 + \overline{x_1} y_1 y_0 + x_1 \overline{x_0} y_1 + x_1 x_0 \overline{y_1} \\ &= x_1 \overline{y_1} (x_0 + y_0) + \overline{x_1} y_1 (x_0 + y_0) \\ C_0 &= x_0 \oplus y_0 \end{aligned}$$

-  : The calculation part of  $C_1$
-  : The calculation part of  $C_0$

JJ数: 527  
面積: 0.60 mm×0.45 mm

フィードバックなし

⇒ 多ビット化による速度低下なし



# 解析用回路まとめ

## FFTプロセッサ

- データは整数型、4ビット(16 LSB)
- バタフライユニット50 GHz動作実証
- 今後はFFTプロセッサ全体の実証へ

## 自己相関器

- 50 GHzを超える動作が可能
- 多ビット入力にも対応可

課題は拡張性と実装

# 天文分野応用への課題

いずれの回路でも1000ビットや  
1000チャンネルを超えるときつい

⇒ 回路作製プロセスの発展  
(高 $J_C$ 化での高速化も)  
NbN回路の開発

室温回路との配線数制限  
帯域は10 Gbps/channel程度

⇒ 解析回路の高機能化  
符号分割多重化で対応

# 全体まとめ

- 天文用解析回路はSFQ回路の有望な応用先
  - ◆ 1方向のデータフロー
  - ◆ 排他的論理和ゲートの有効利用
- 超伝導回路による解析回路例
  - ◆ (乱数生成器)
  - ◆ FFTプロセッサ
  - ◆ 自己相関器
- 拡張性、実装が課題
  - ◆ 仕様に応じた専用設計で対応
  - ◆ 入出力IFは頑張るしかない



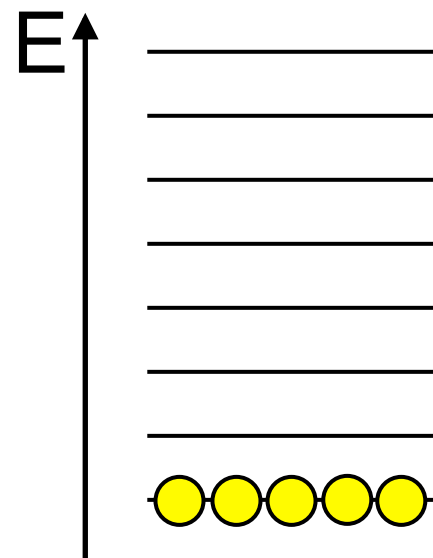
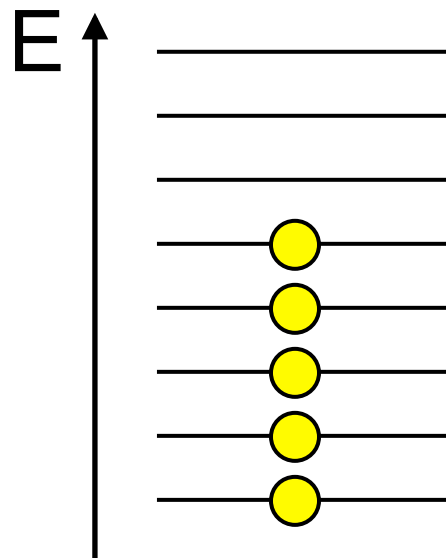
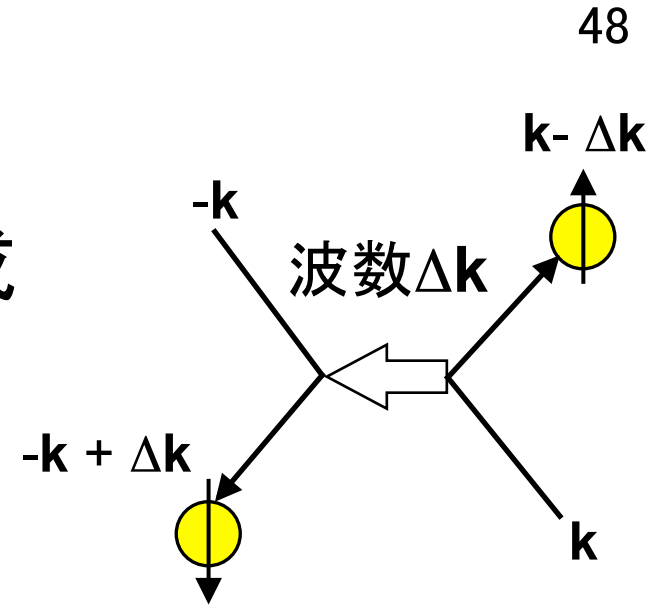


# 超伝導？

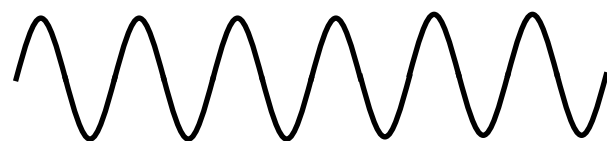
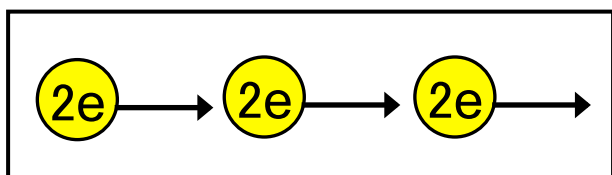
2電子が対(クーパー対)を構成  
Bosonとして振る舞う

超伝導:

クーパー対のBose-Einstein凝縮

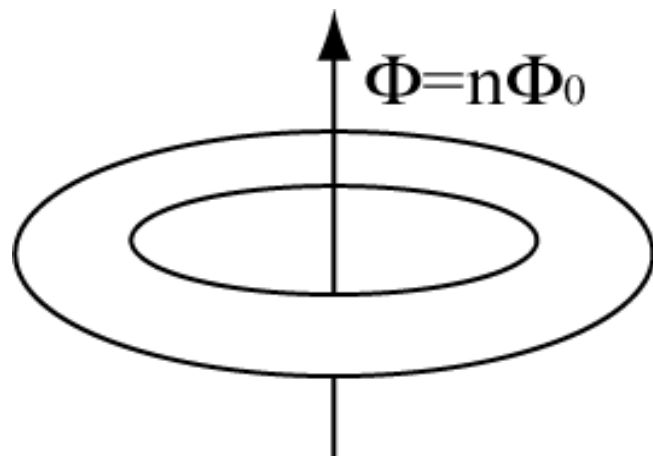


# 巨視的量子効果



$$[\theta, n] = -i$$

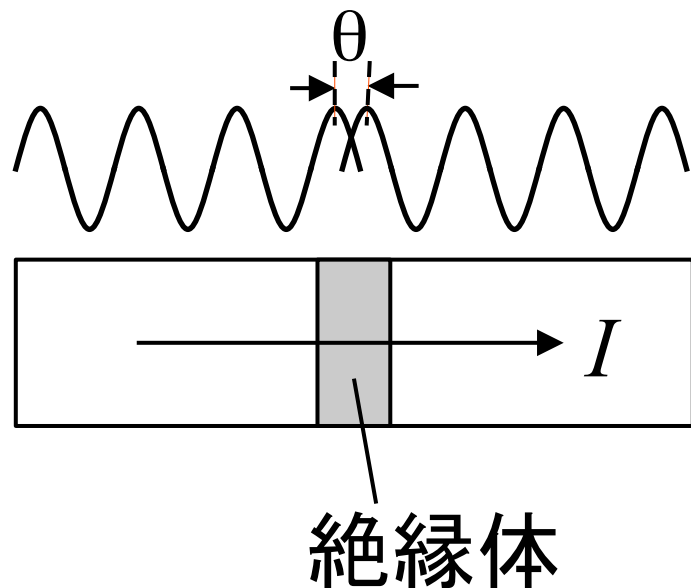
巨視的な系においても、  
状態が1つの波動関数で  
記述可能



超伝導リング中の磁束：  
「磁束量子」の整数倍になる

$$\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$

# ジョセフソン接合 (JJ)



1962, B.D.  
Josephson

$$I = I_C \sin \theta$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\theta}{dt}$$

超伝導位相が電気信号  
として直接見える素子

電気信号で位相の制御