

加速器セミナー資料

「光ファイバを用いた超高安定な 加速器用基準信号分配システム」

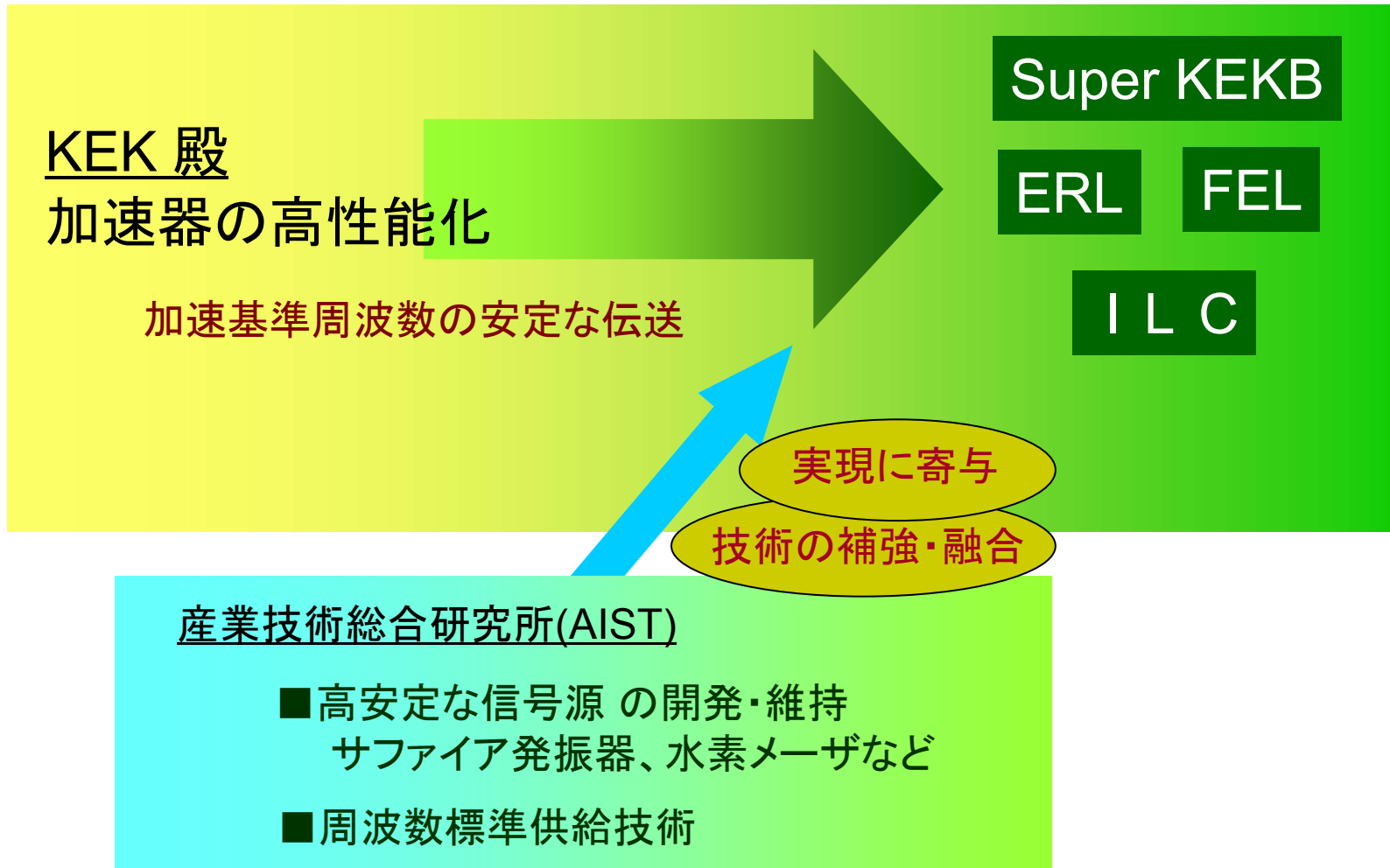
平成21年8月27日

産業技術総合研究所(AIST)
計測標準研究部門(NMIJ)
時間周波数科
周波数システム研究室

内 容

1. 共同開発の背景・目標
2. 周波数標準の基礎（評価指標）
3. 光ファイバ位相補償技術の開発状況
4. 今後の予定

背景



平成21年度 高エネルギー加速器研究機構 共同開発研究

「光ファイバを用いた低コスト・超高安定な 加速器用基準信号分配システムの開発」

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 殿

内藤孝様、浦川順治様、海老原清一様、照沼信浩様

産業技術総合研究所(AIST)

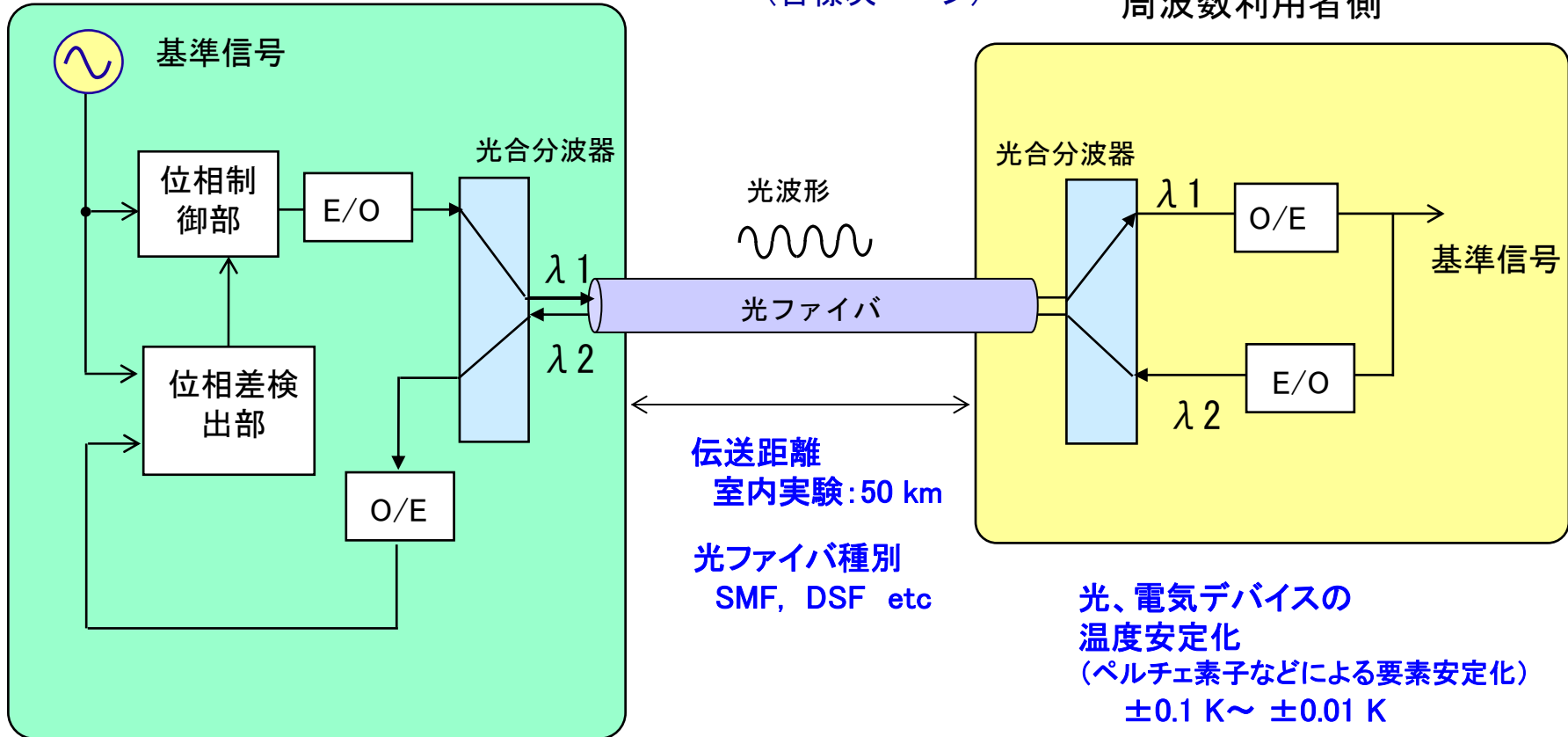
雨宮正樹、今江理人、藤井靖久、鈴山智也

テーマの内容と目標

周波数標準送信側

低コスト・超高安定
(目標次ページ)

周波数利用者側



O/E: 光電気変換部

E/O: 電気光変換部

加速器関連のニーズ動向と可能な信号源

加速器関連 (FEL等)	所要アラン標準偏差 $\sigma_y(\tau) \quad \tau = 1 \text{ s}$	信号源
today < 100 fs rms (FEL 2006より)	$\sigma_y = 1.7 \times 10^{-13}$	水素メーザ
in 3years < 10 fs rms	$\sigma_y = 1.7 \times 10^{-14}$	光格子時計(東大、現状)
in 6years < 1 fs rms ?	$\sigma_y = 1.7 \times 10^{-15}$	Cryogenic Sapphire Osc. (CSO) 光格子時計(NMIJ、将来?)

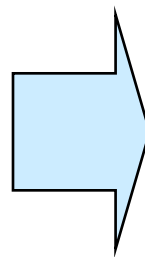
仮定: 雑音は白色PMとする。

古典的分散とアラン分散の関係は

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3}{2} \sigma^2(\bar{y})$$

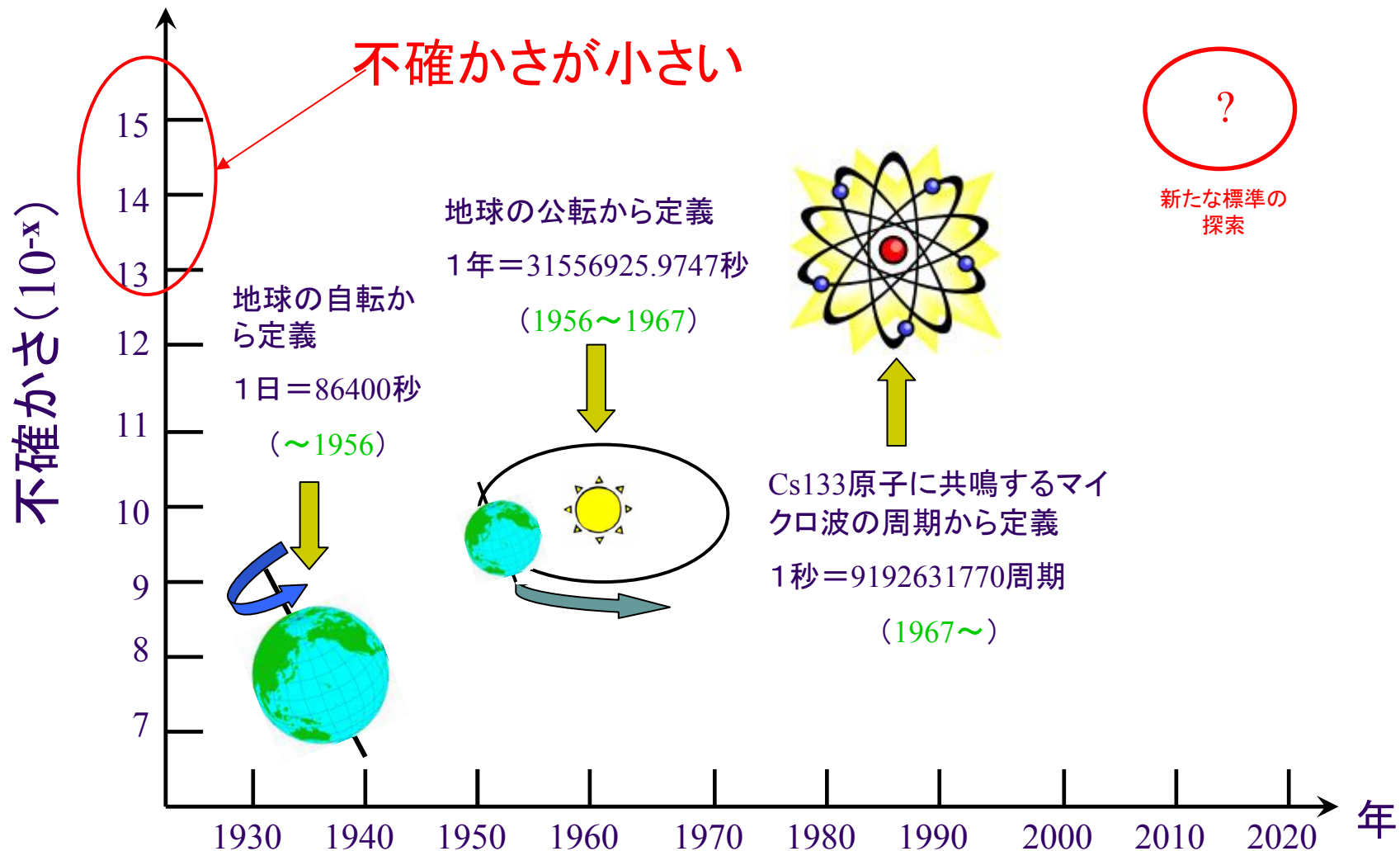
古典的分散と時間変動 $x(t)$ の標準偏差 σ_x の関係

$$\sigma^2(\bar{y}) = \frac{2}{\tau^2} \sigma_x^2$$

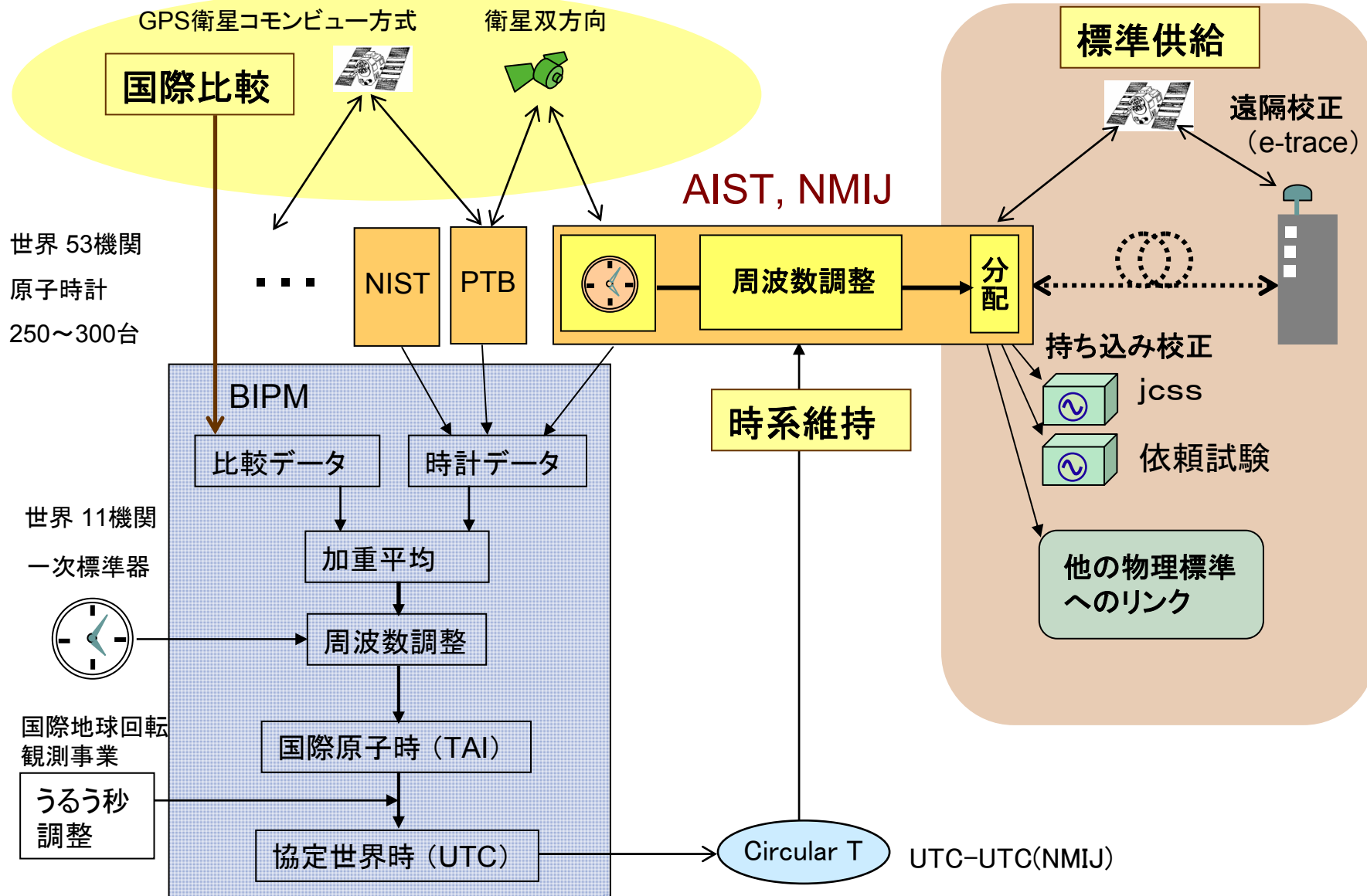


$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{3} \frac{\sigma_x}{\tau}$$

時間(秒)の定義



時系発生維持及び時間/周波数標準の供給



周波数安定度

$$V(t) = (V_0 + \varepsilon(t)) \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi(t))$$

V_0 : 電圧振幅の公称値

$\varepsilon(t)$: 振幅の公称値からの偏差

f_0 : 周波数の公称値

$\phi(t)$: 位相の公称値($2\pi f_0 t$)からの偏差

相対的な周波数偏差

$$y(t) \equiv \frac{f(t) - f_0}{f_0} = \frac{\dot{\phi}(t)}{2\pi f_0} = \frac{dx(t)}{dt}$$

$$x(t) \equiv \frac{\phi(t)}{2\pi} T_0$$

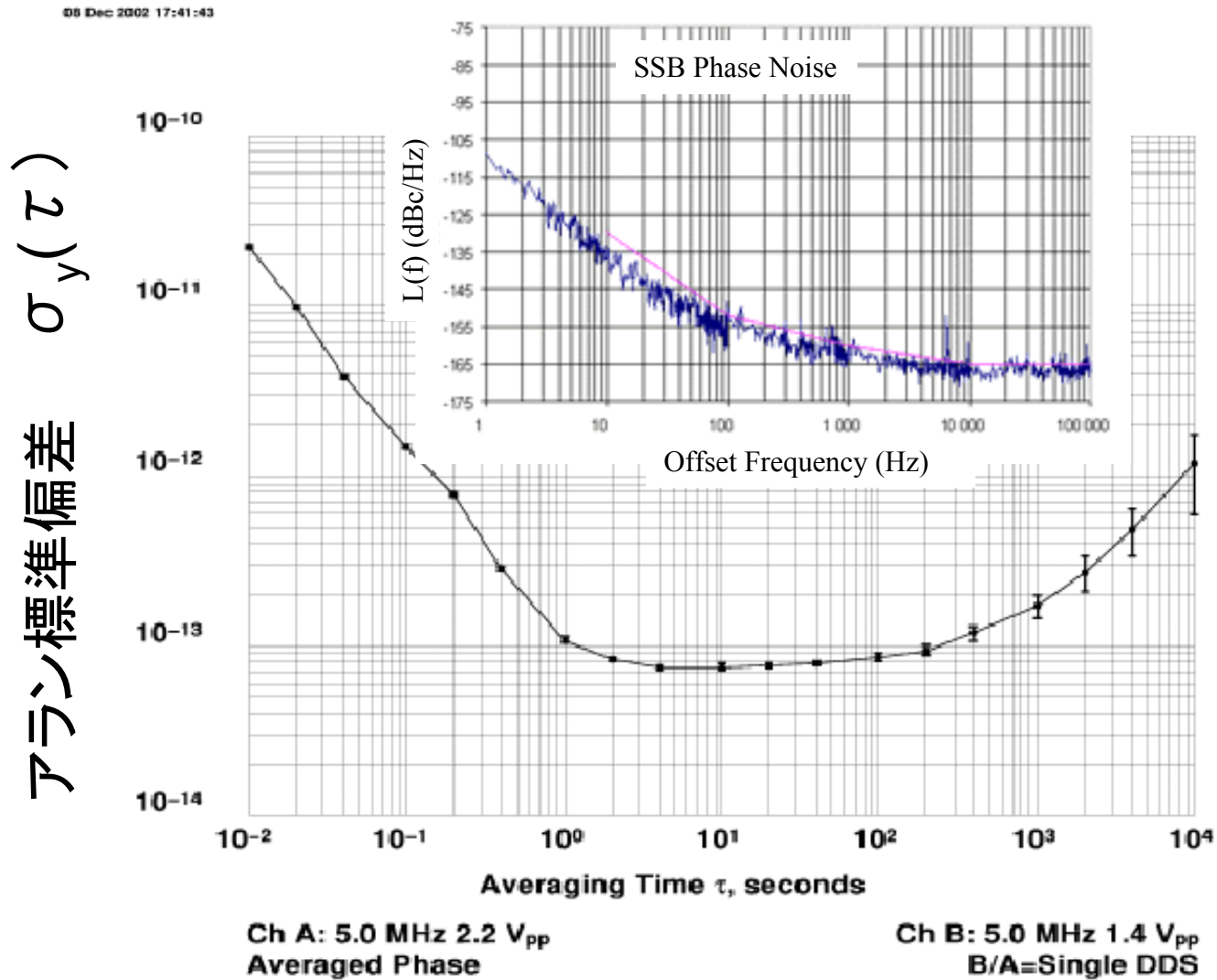
$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = \frac{x(t_k + \tau) - x(t_k)}{\tau} = \frac{x_{k+1} - x_k}{\tau}$$

アラン標準偏差

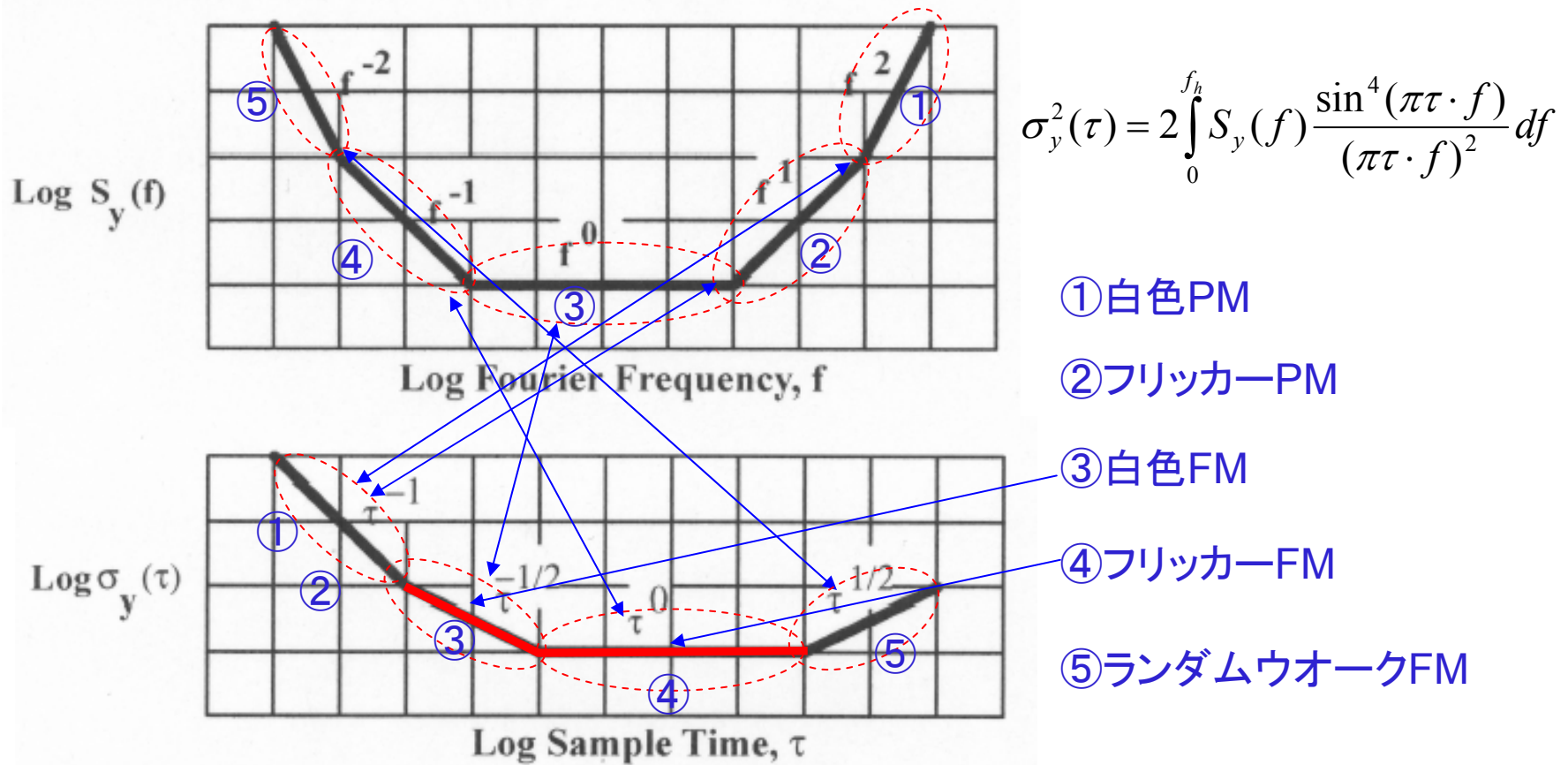
$$\sigma_y = \left[\frac{1}{2} \langle [\bar{y}(t + \tau) - \bar{y}(t)]^2 \rangle \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{2} \langle [\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k]^2 \rangle \right]^{1/2}$$

参照: IEEE Std 1139-1999

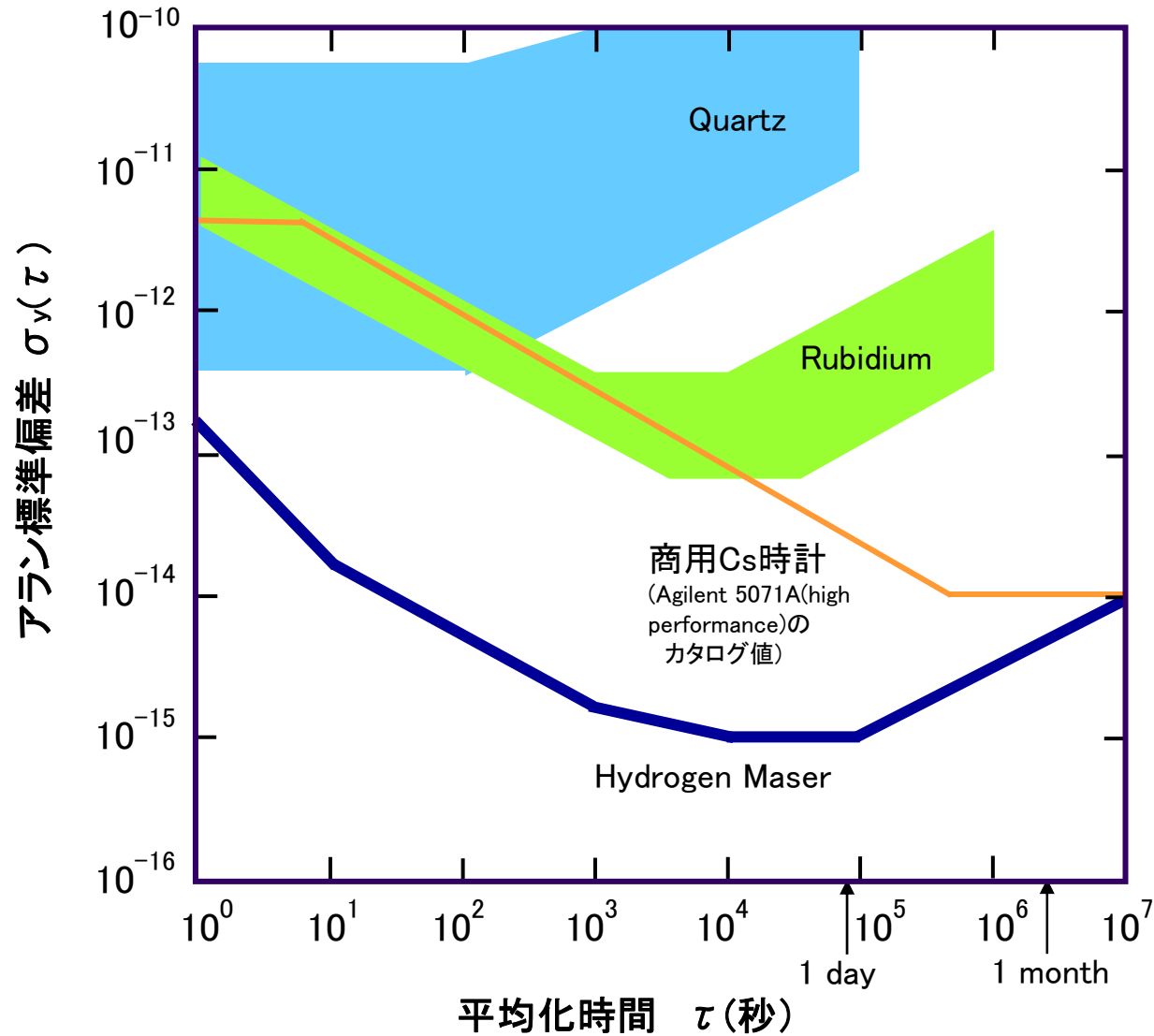
高性能な水晶発振器の例



雑音と周波数安定度



各種発振器の周波数安定度の例

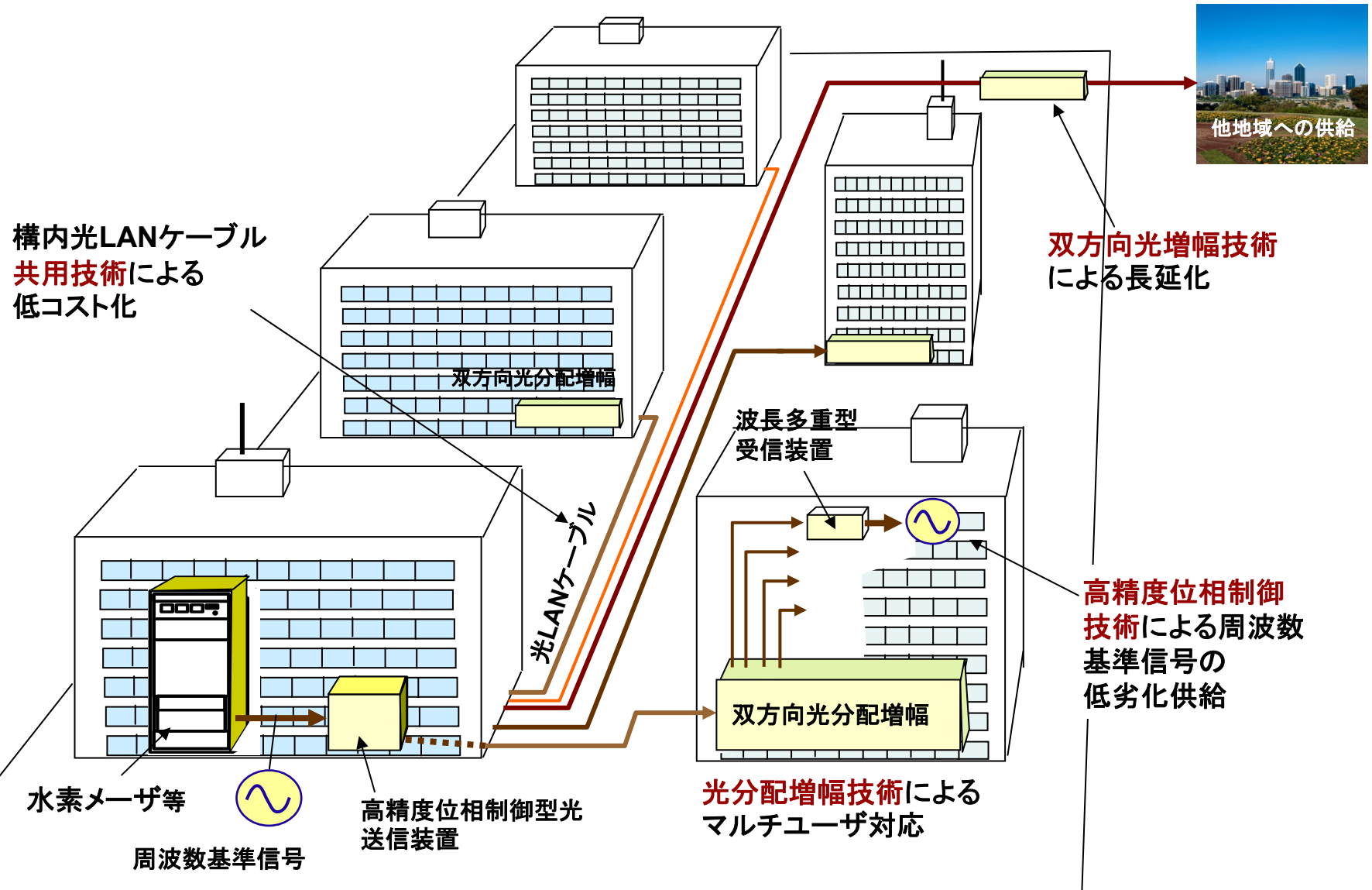


電力スペクトルとアラン標準偏差

雑音の種類	$S_{\phi}(f)$	$S_y(f)$	アラン標準偏差 $\sigma_y(\tau)$
白色PM	$\propto f^0$	$\propto f^2$	$\propto \tau^{-1}$ アラン分散 = 1.5 × 古典的分散
フリッカPM	$\propto f^{-1}$	$\propto f^1$	$\propto \tau^{-1}$
白色FM	$\propto f^{-2}$	$\propto f^0$	$\propto \tau^{-1/2}$ アラン分散 = 古典的分散
フリッカFM	$\propto f^{-3}$	$\propto f^{-1}$	$\propto \tau^0$ 古典的分散は発散
ランダム ウォークFM	$\propto f^{-4}$	$\propto f^{-2}$	$\propto \tau^{1/2}$ 古典的分散は発散

「ハイテクものづくりプロジェクト」

事業所構内、キャンパス等への本装置類の適用形態、効果のイメージ図



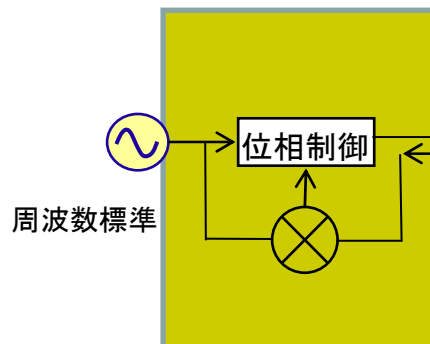
開発システムの目標と技術的検討課題

分配増幅伝送周波数の柔軟化

10 M~100 MHz ⇒ 10 M~1 GHz
(現状)

(1) 高精度位相制御送信装置

- ・光ファイバ遠端点の位相を固定
→ 波長多重双方向伝送と光送受信



光ファイバ伝送路 (温度変動等による位相変動あり)

周波数基準信号の劣化を抑圧して供給

システム雑音: 1×10^{-13} 以下 @ 1 s
 1×10^{-15} 以下 @ 1 日

(2) 光受信装置

- ・ファイバ損失変動耐力
- ・高安定、高SNR受信

遠端

ユーザ

(3) 双方光増幅装置

双方向光増幅技術による長延化

従来、主に屋内⇒ 100 km圏内へ拡張

- ・雑音の累積による信号劣化
- ・高安定高出力光増幅
- ・光非線形効果による信号劣化の抑圧

(4) 光分配増幅装置

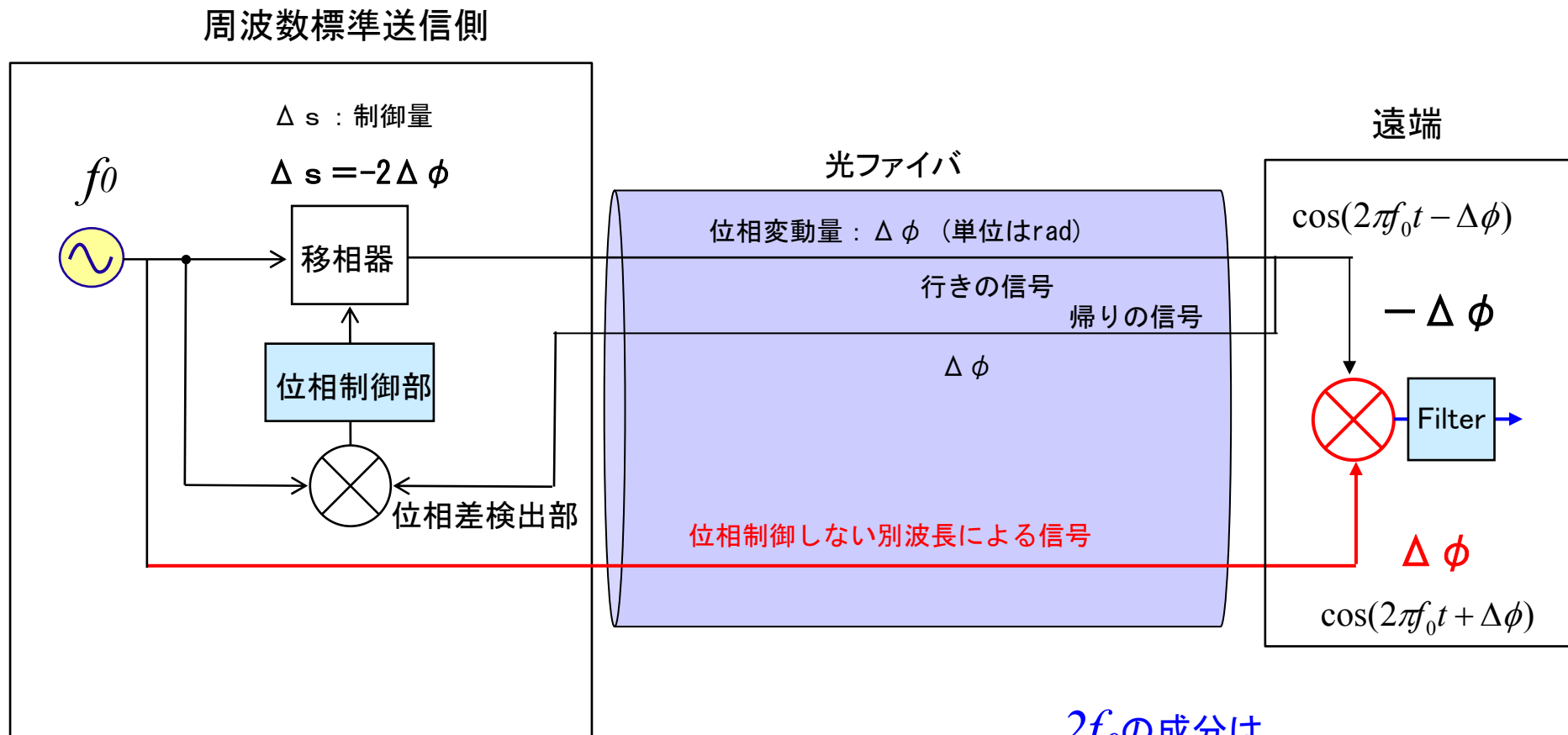
光分配増幅技術によるマルチユーザ対応

従来、数10 ⇒ 100分配へ (低コスト供給)

- ・損失増→光増幅
(分配信号間のアイソレーション確保)

(1) 高精度位相制御送信装置

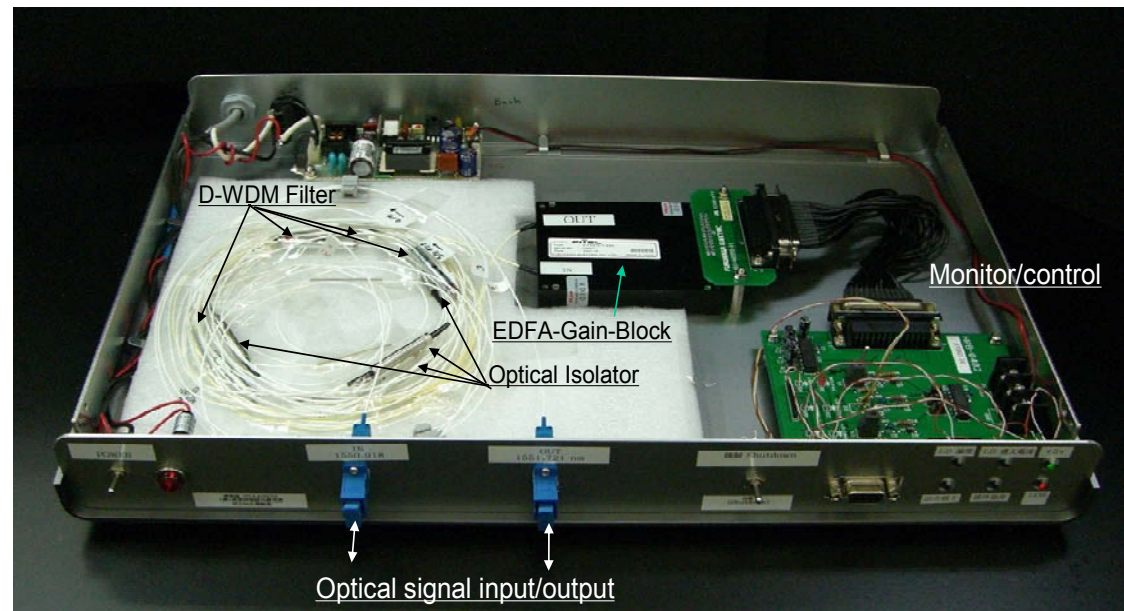
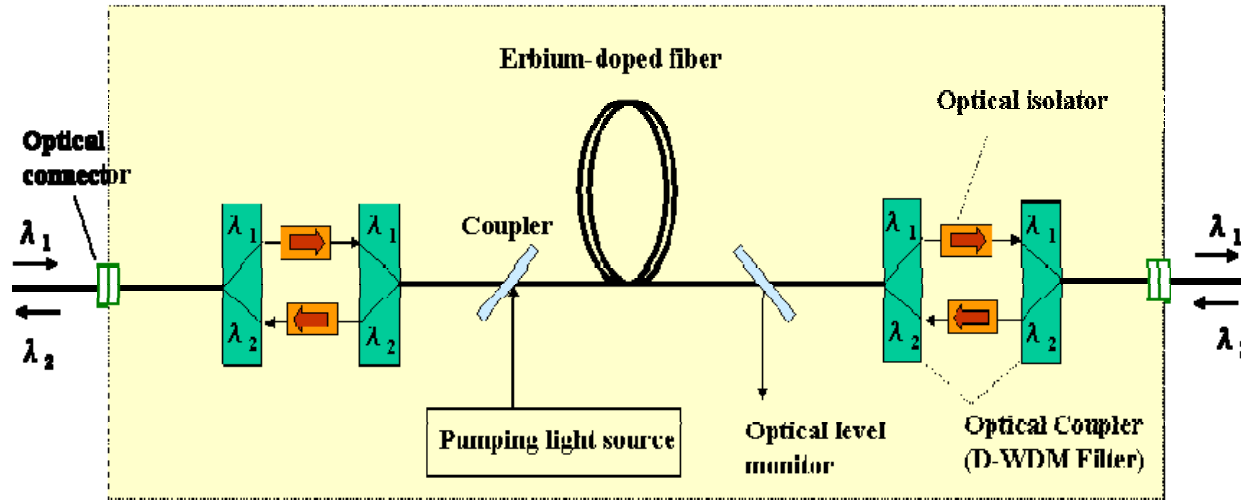
位相制御方法：遠端で位相変動をキャンセル



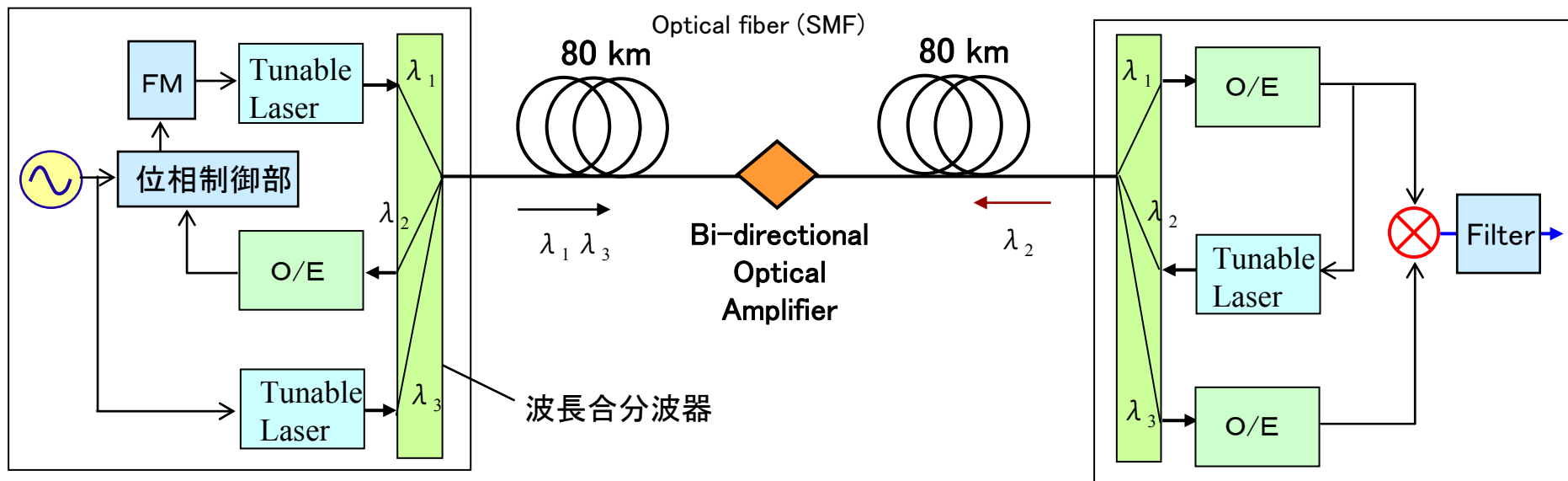
$2f_0$ の成分は

$$\cos(2\pi f_0 t - \Delta\phi) \cos(2\pi f_0 t + \Delta\phi) \longrightarrow \cos(2\pi(f_0 + f_0)t + \Delta\phi - \Delta\phi)$$

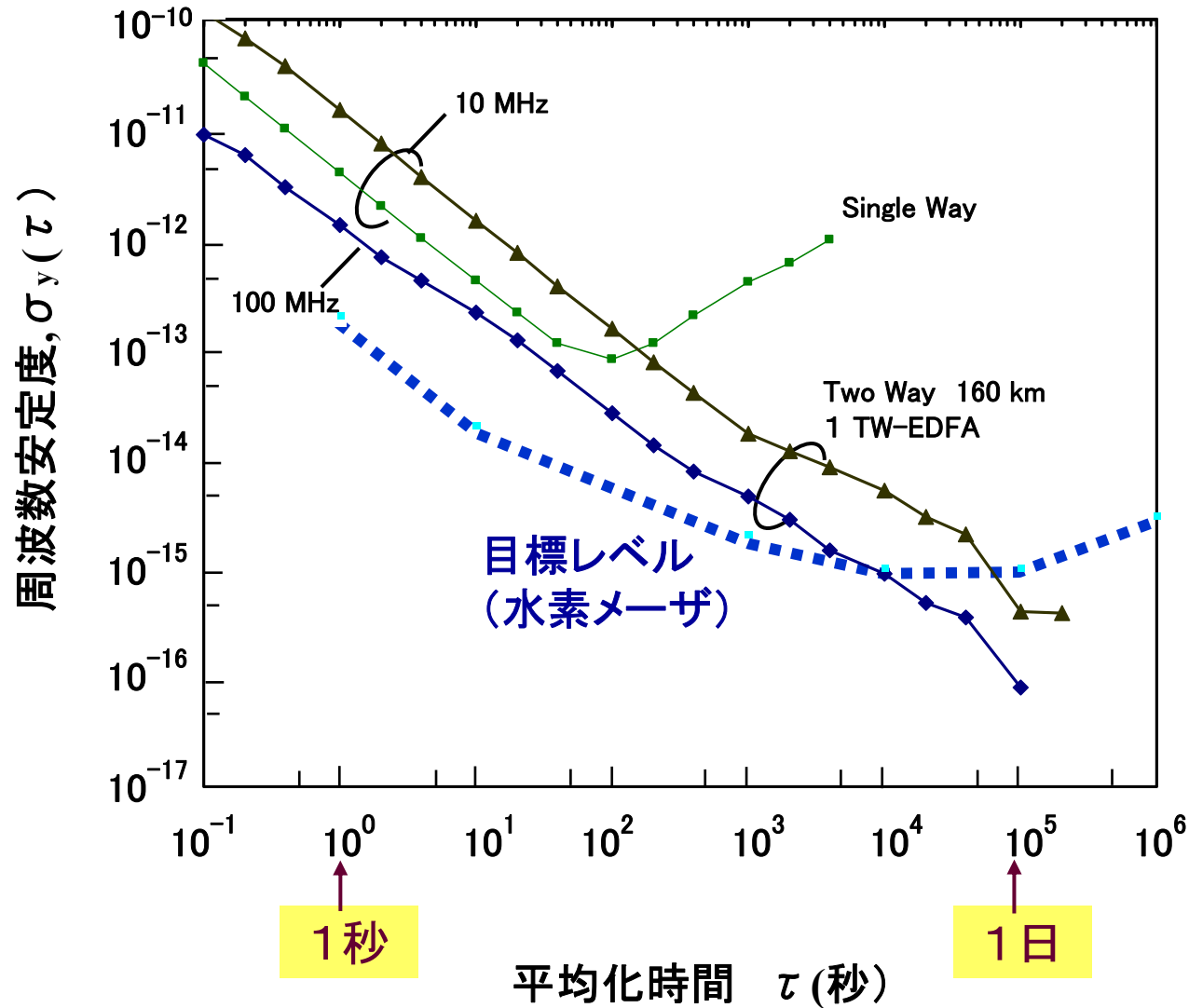
双方向光増幅器



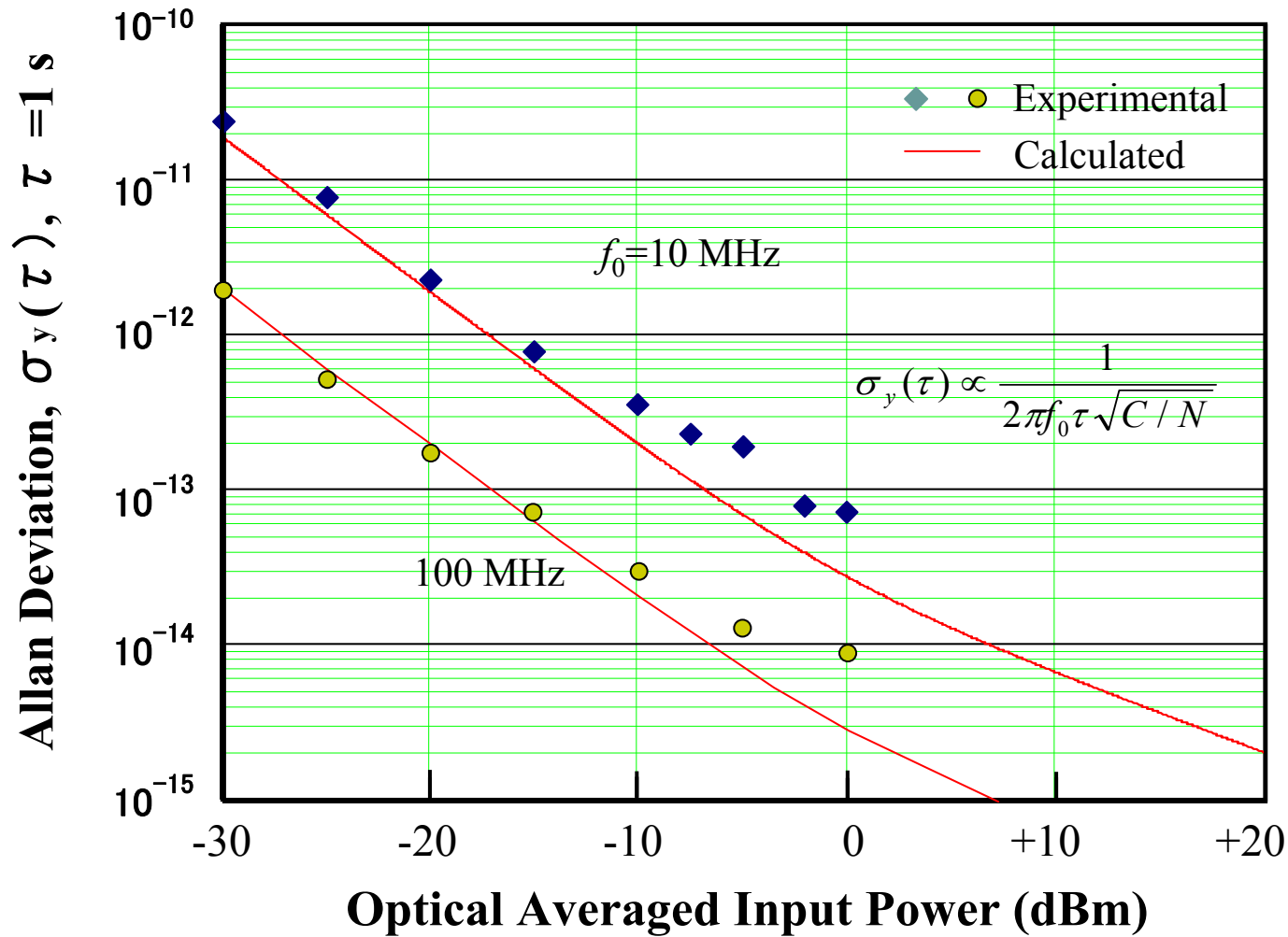
双方向位相制御実験系



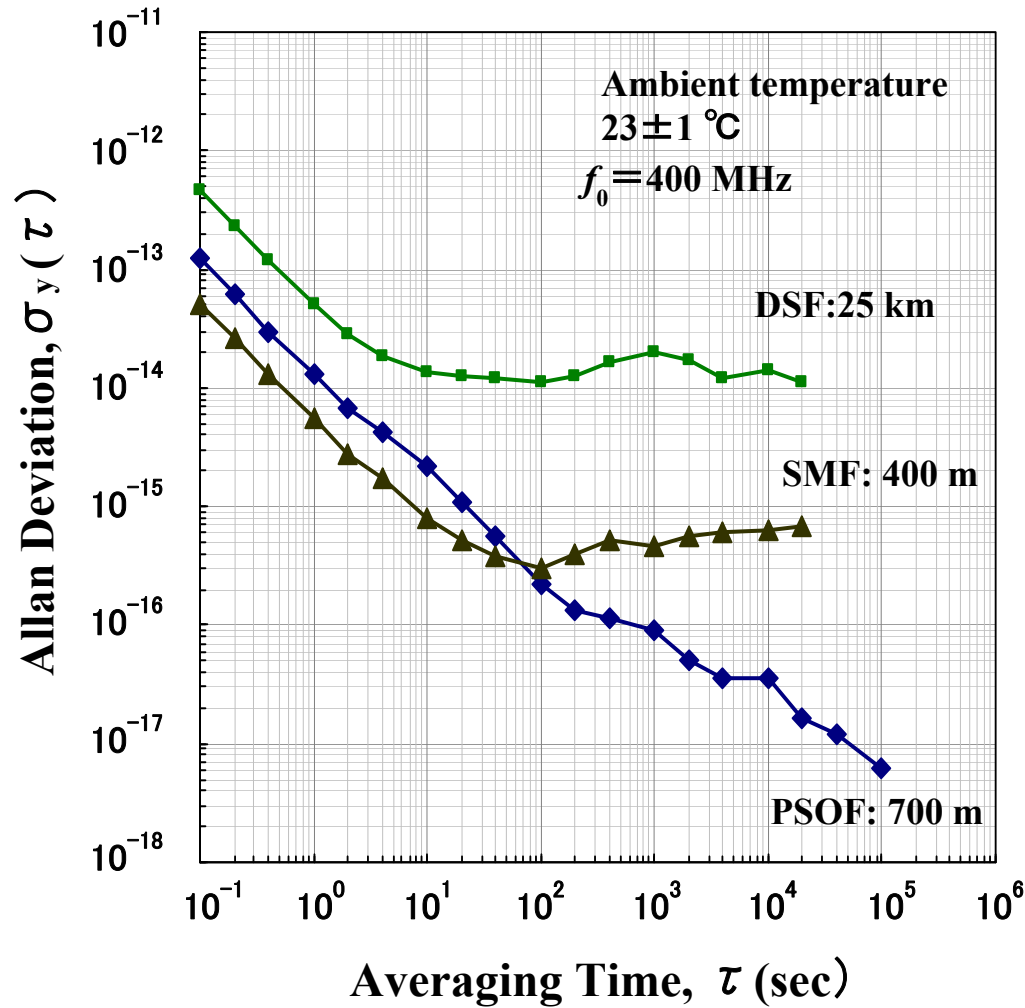
双方向位相制御実験の結果



光受信レベルと短期安定度(1秒)



局内伝送用短距離光ファイバの周波数安定度

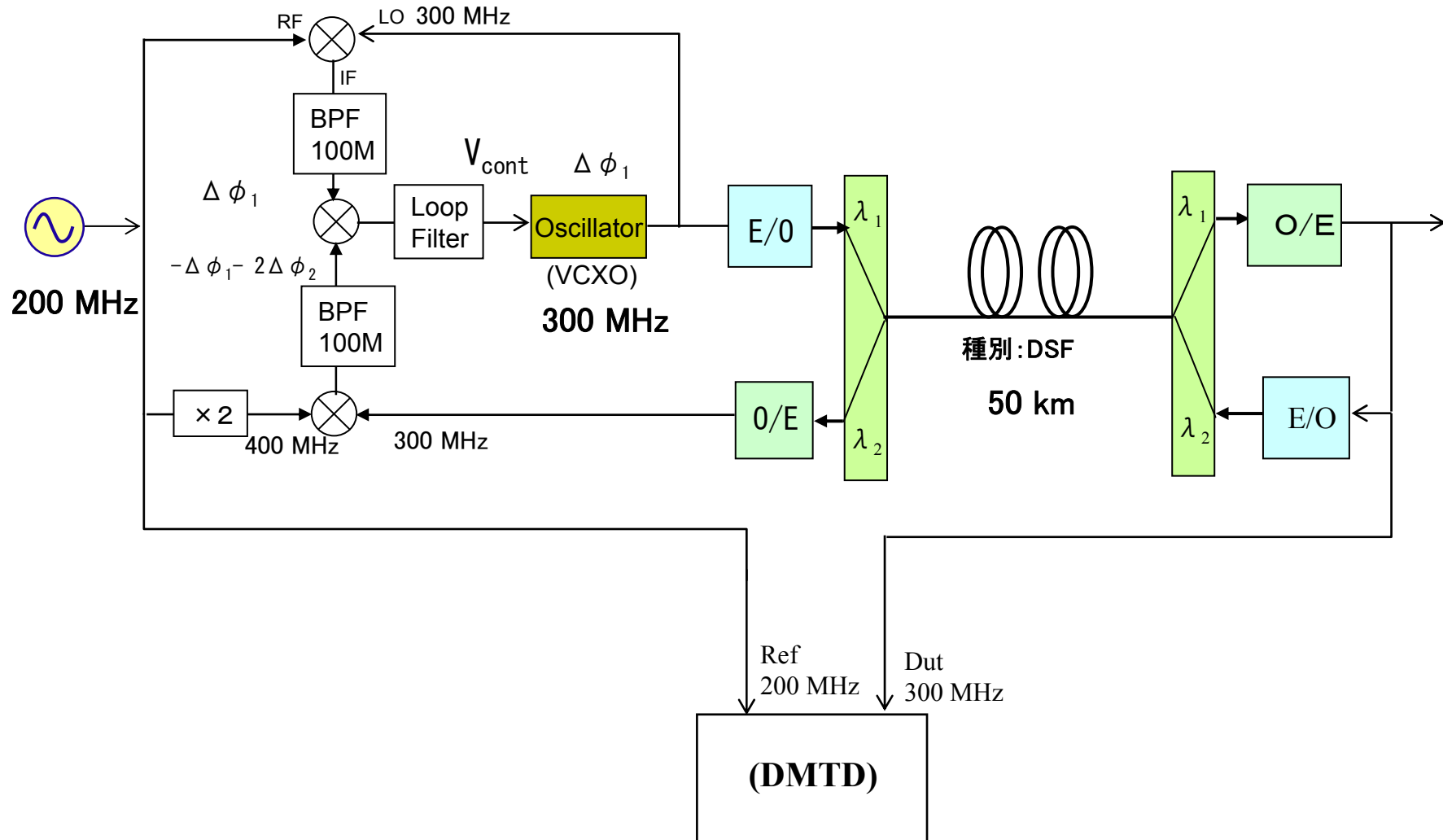


「光ファイバによる周波数標準の高精度供給装置」

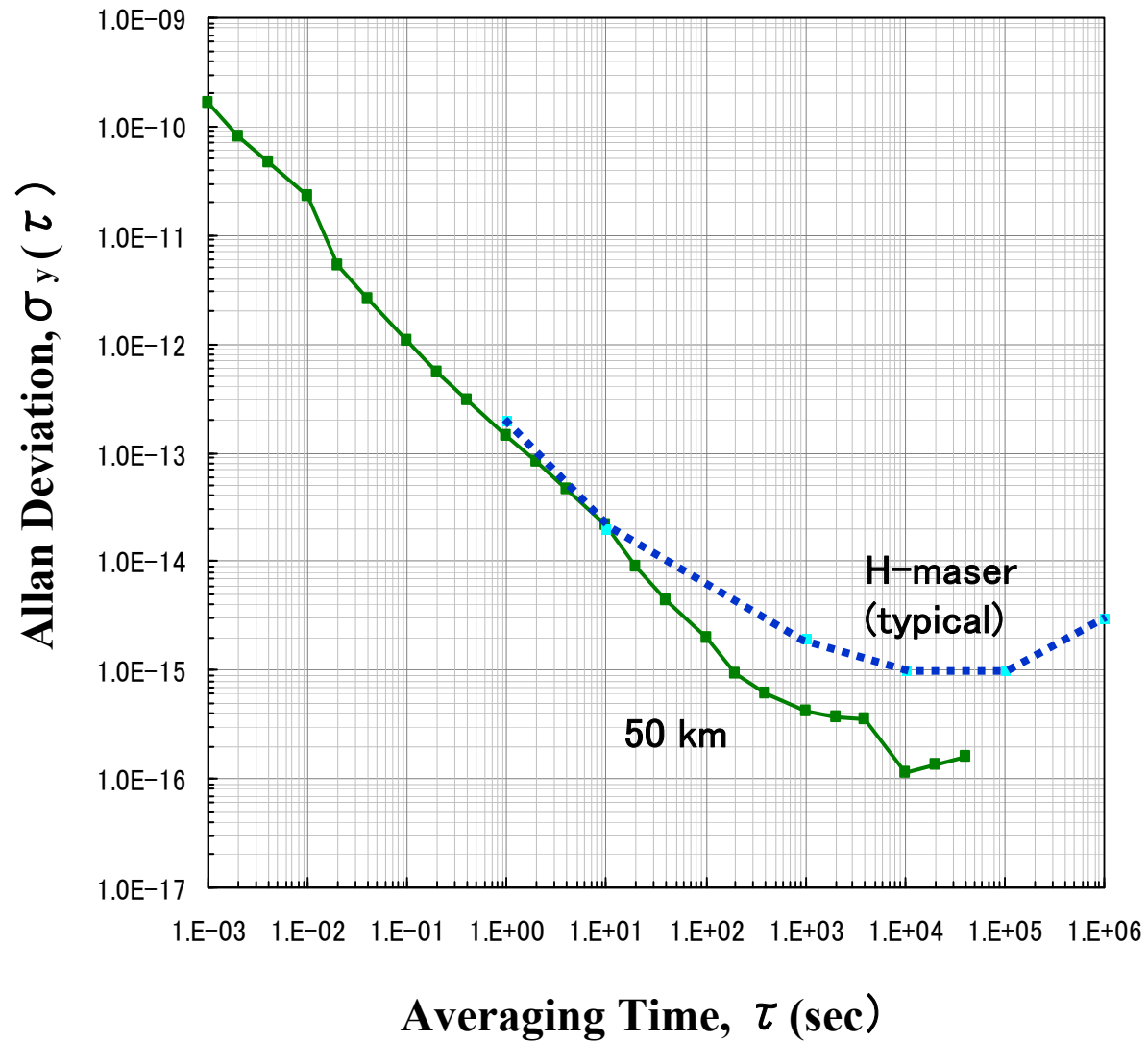
雨宮、今江、藤井、鈴山(AIST)
内藤、浦川、海老原、照沼(KEK)

電気学会の電子回路研究会(9月8日開催)
〔開催日時〕平成21年9月8日(火)9:00~12:00
〔開催場所〕東京電機大学神田キャンパス

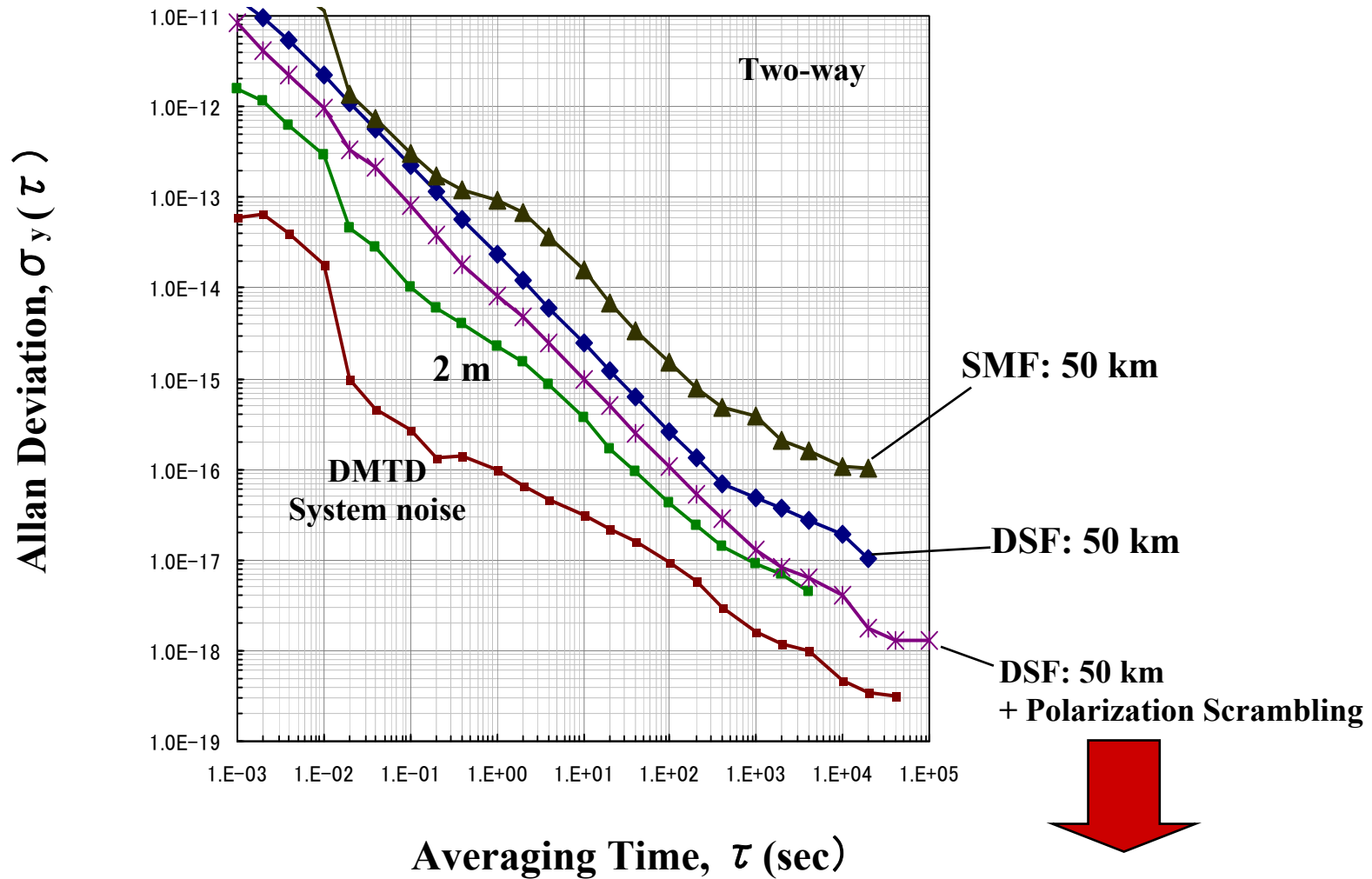
位相制御回路の実験系



位相制御回路の実験結果



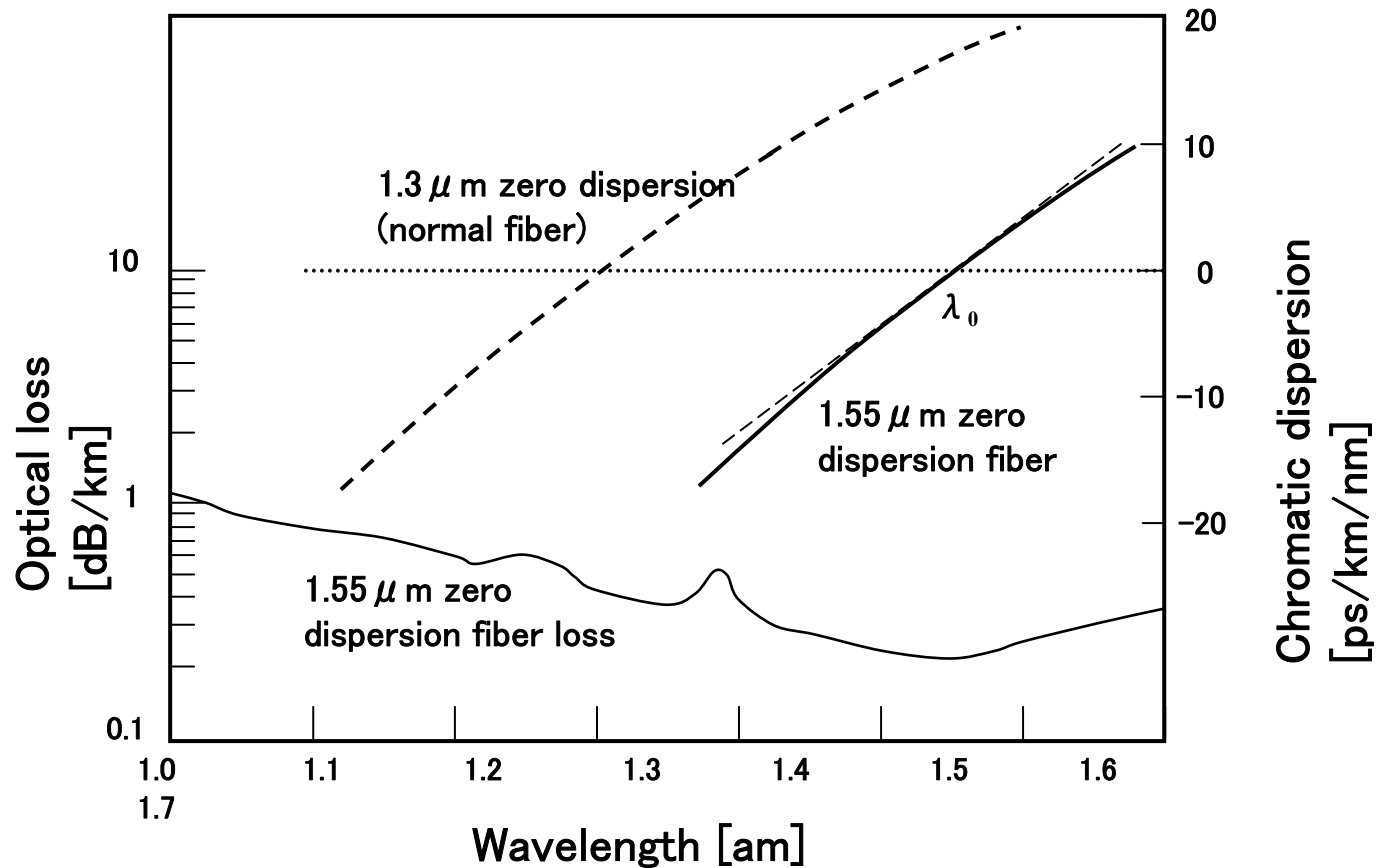
ファイバ種別と周波数安定度測定結果



信号: CSO1; 10.8123 GHz, LO: 10.8023 GHz

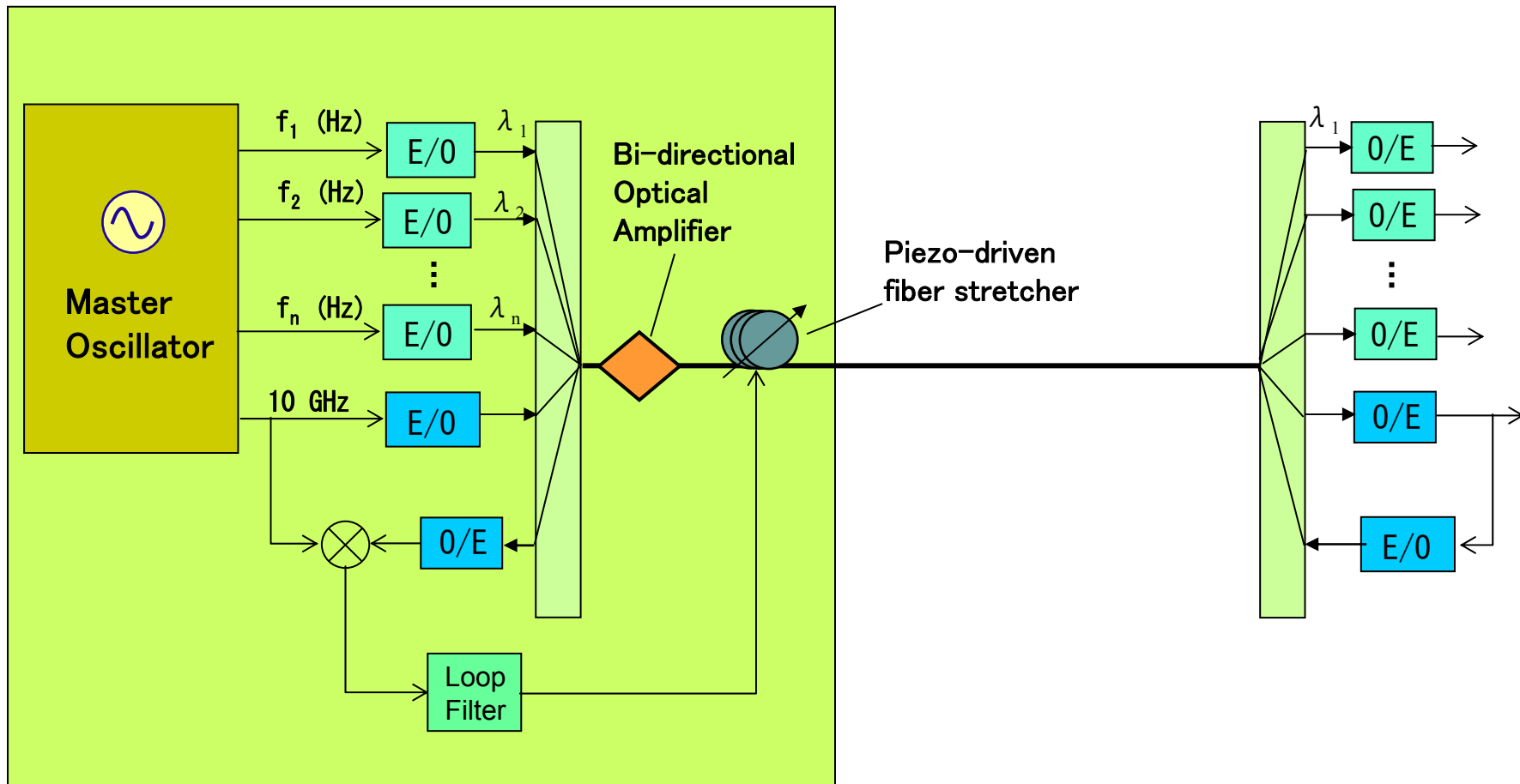
1.5 μ m分散シフトファイバ(DSF)が有利

光ファイバの分散・損失特性



今後に向けて

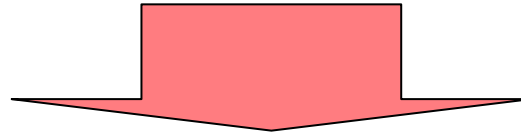
ファイバストレッチャーを用いた位相補償システムの検討(案)



今後の予定

室内実験

- VCXO(シンセのFM機能で確認)を用いた位相補償システムの検証
- ファイバストレッチャーを用いた位相補償システムの検証

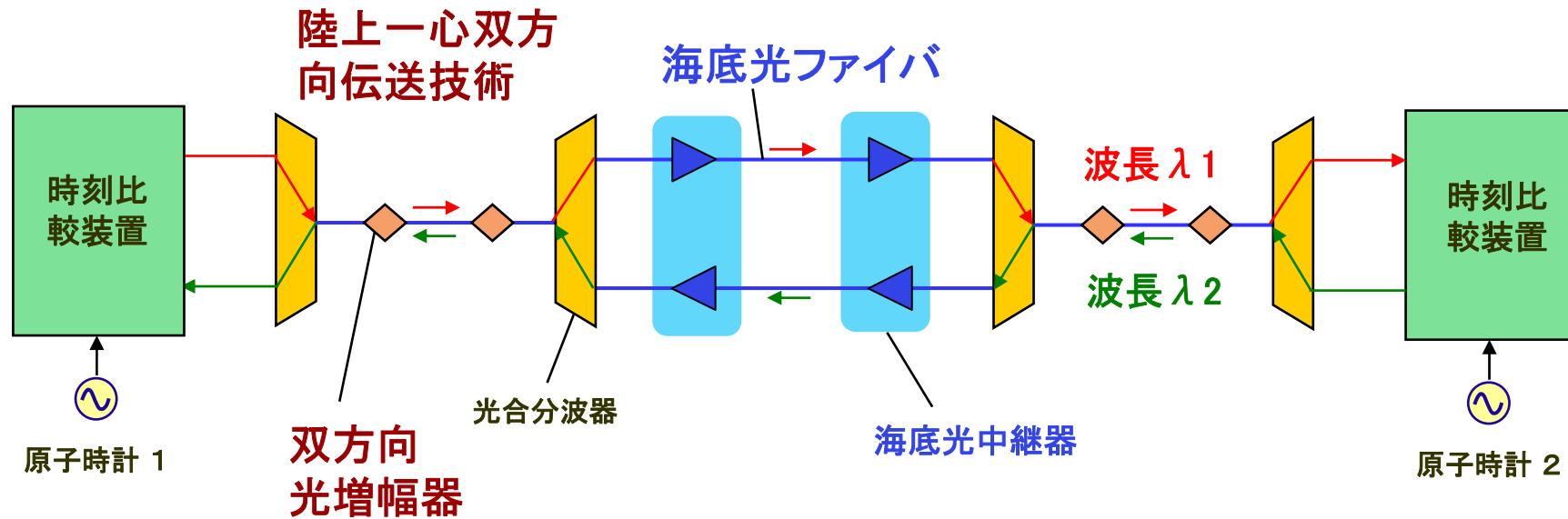


実環境化の試験

年後半・・・

KEK加速器の予備心線を用いた試験

既設海底システムを用いた比較システム案



海底光ケーブルネットワークと陸揚げ点近くの標準機関

