

9. SGX攻撃編②

Ao Sakurai

2023年度セキュリティキャンプ全国大会
L5 - TEEの活用と攻撃実践ゼミ

本セクションの目標



- Controlled-Channel攻撃とPlundervolt攻撃の解説を行う
- mprotectシステムコールを用いる事により、ごく簡単かつ擬似的なControlled-Channel攻撃を実践する
- SGX-Vaultの実装の一部に対し、Controlled-Channel攻撃に対する軽減策の導入を行う

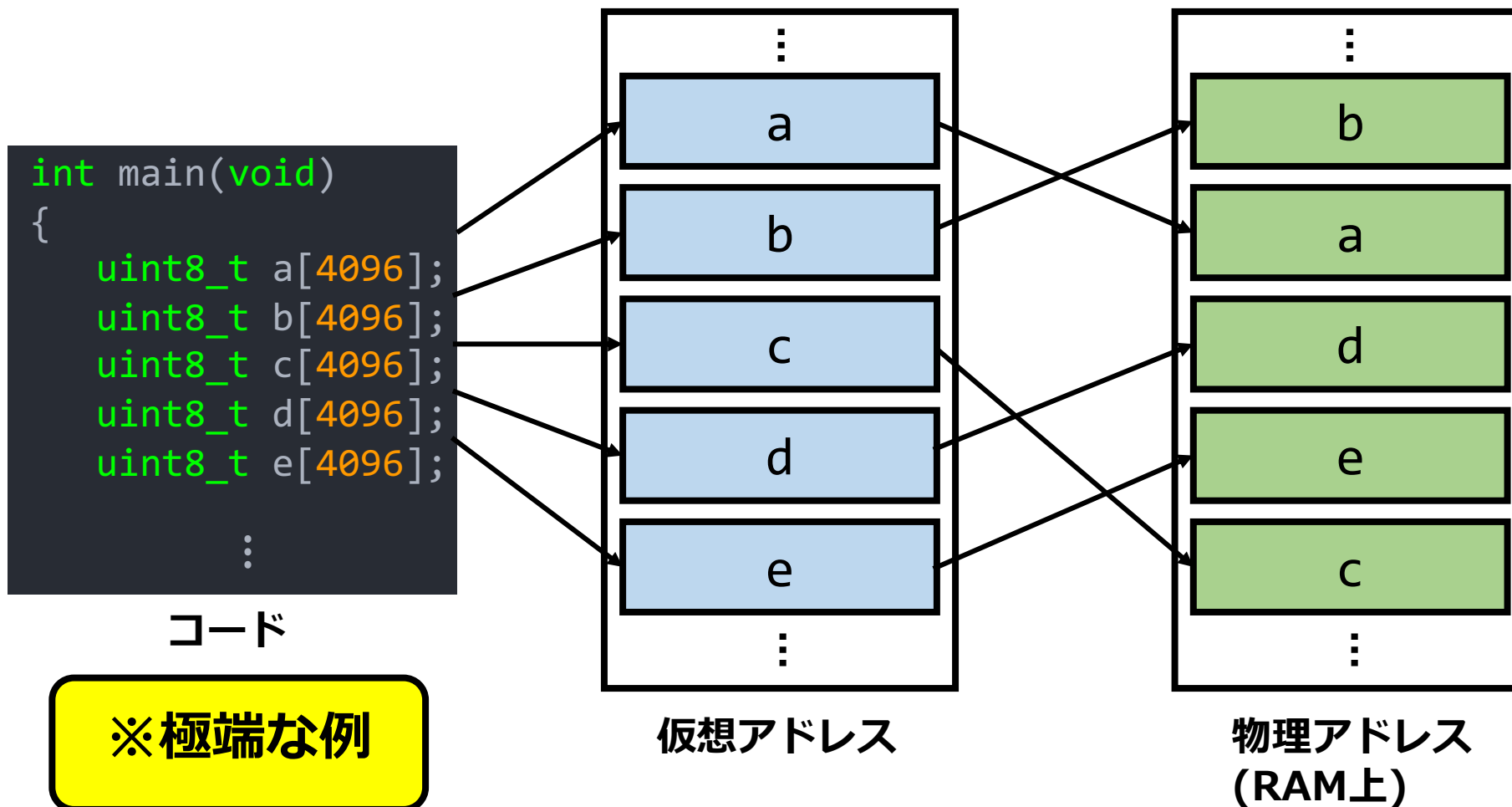
Controlled-Channel攻撃



- **SGX**のような**防護システム**に対して**非常に有効なサイドチャネル攻撃**の一つ
- この攻撃では**ページフォルト**を悪用する
- 以下、OSは**攻撃者**により**制御権を掌握されている**と仮定する
- この攻撃では**3つ**のフェーズが存在する：
 1. コード・実行バイナリに対する**オフライン解析**
 2. **オンライン解析** (①実行バイナリを実行; ②ページフォルト起動; ③観測)
 3. 観測結果から**秘密を推定**



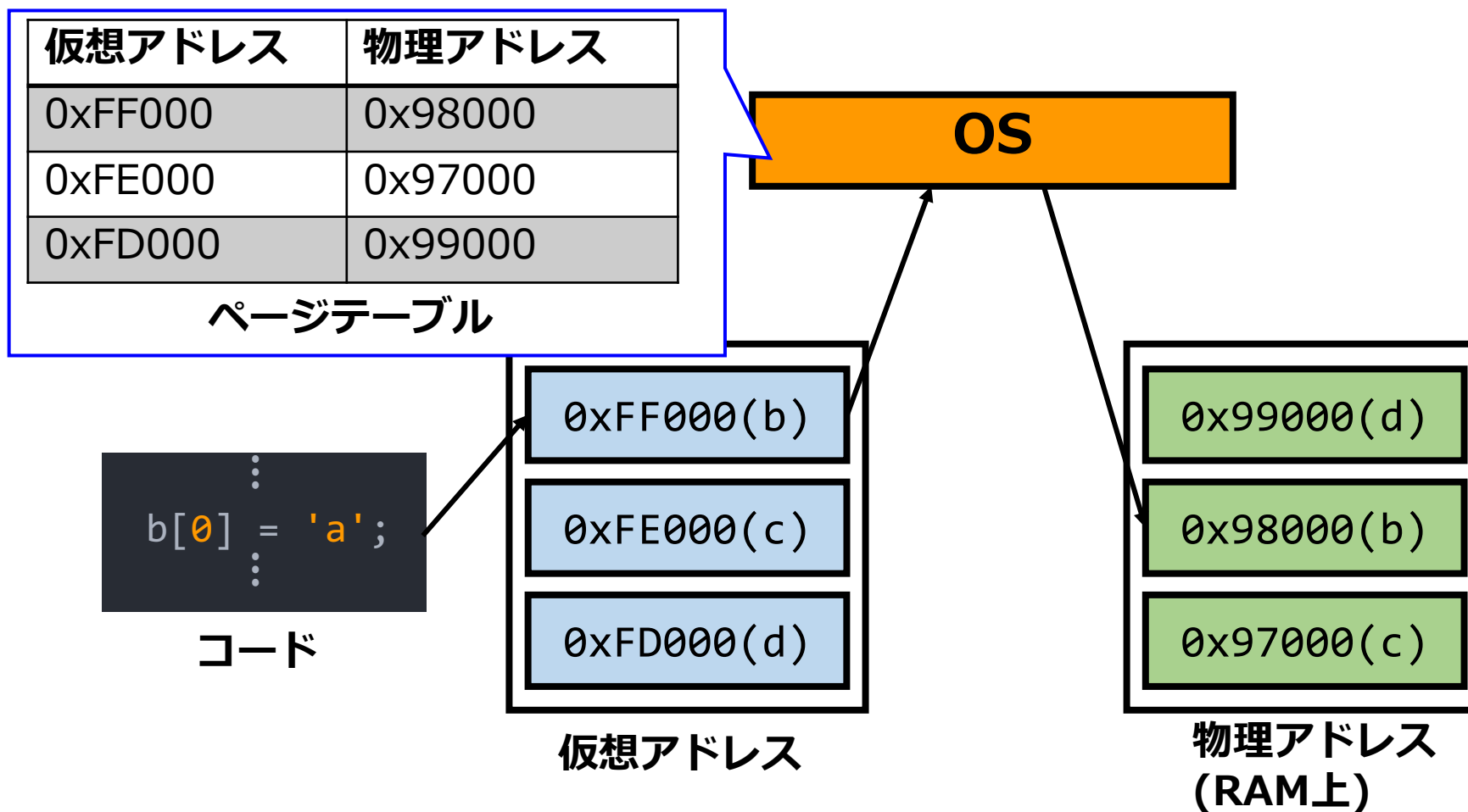
- 仮想記憶を実装するためのアルゴリズム



ページテーブル



- OSは**ページテーブル**を用いて**仮想アドレス**に対応する**物理アドレス**を取得する

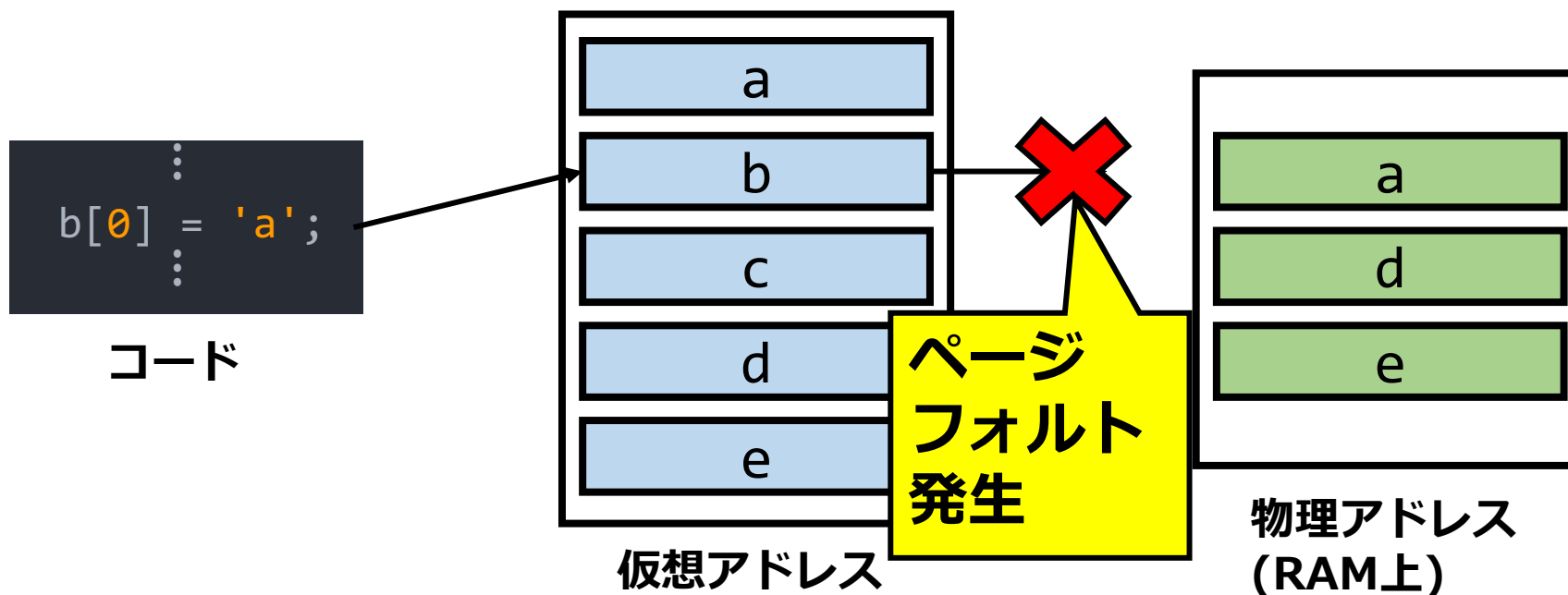


ページフォルト



- ページフォルト: 以下の状況が発生した場合に発生する、必ずしも致命的ではないエラーの事

1. プログラムが**仮想ページ**にアクセスする
2. OSが何らかの原因 (ページアウト、**アクセス制限**等)により**物理アドレス**を**仮想アドレス**から**導出できない**



入力依存処理



- ある**処理実行**が**特定の入力データ**によって**条件的に決定される**時、それを**入力依存処理**と呼ぶ
 - 例: ifブロックに囲まれた処理
- 入力依存処理には**2種類**存在する：
 - 入力依存**制御転送**
 - 入力依存**データアクセス**

入力依存制御転送



- 変数**s**によって**どちらの関数**にアクセスされるかが決定される時、それを「**入力依存制御転送**」と呼ぶ

```
char* WelcomeMessage(GENDER s) {  
    char *mesg;  
  
    //GENDER is an enum of MALE and FEMALE  
    if(s == MALE) {  
        mesg = WelcomeMessageForMale();  
    }  
    else {  
        mesg = WelcomeMessageForFemale();  
    }  
  
    return mesg;  
}
```

入力依存制御転送

入力依存制御転送

入力依存データアクセス



- 変数**s**によって**どちらのデータ**にアクセスされるかが決定される時、それを「**入力依存データアクセス**」と呼ぶ

```
void* CountLogin(GENDER s) {  
  
    if(s == MALE) {  
        gMaleCount++;  
    }  
    else {  
        gFemaleCount++;  
    }  
  
    return;  
}
```

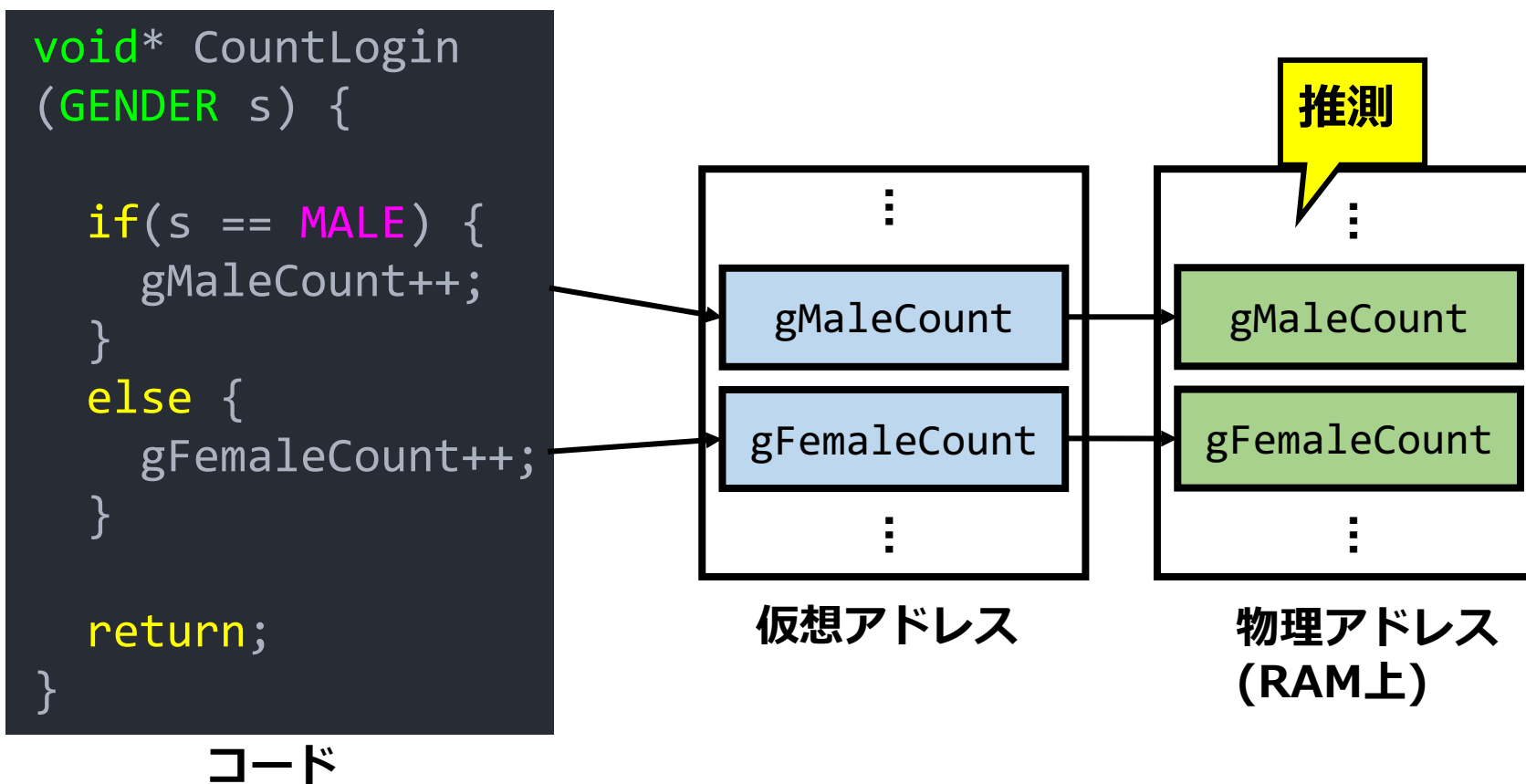
入力依存データアクセス

入力依存データアクセス

Phase 1. オフライン解析



- 実行バイナリやソースコードを解析し、gMaleCountやgFemaleCountがロードされる**アドレスを推測**する

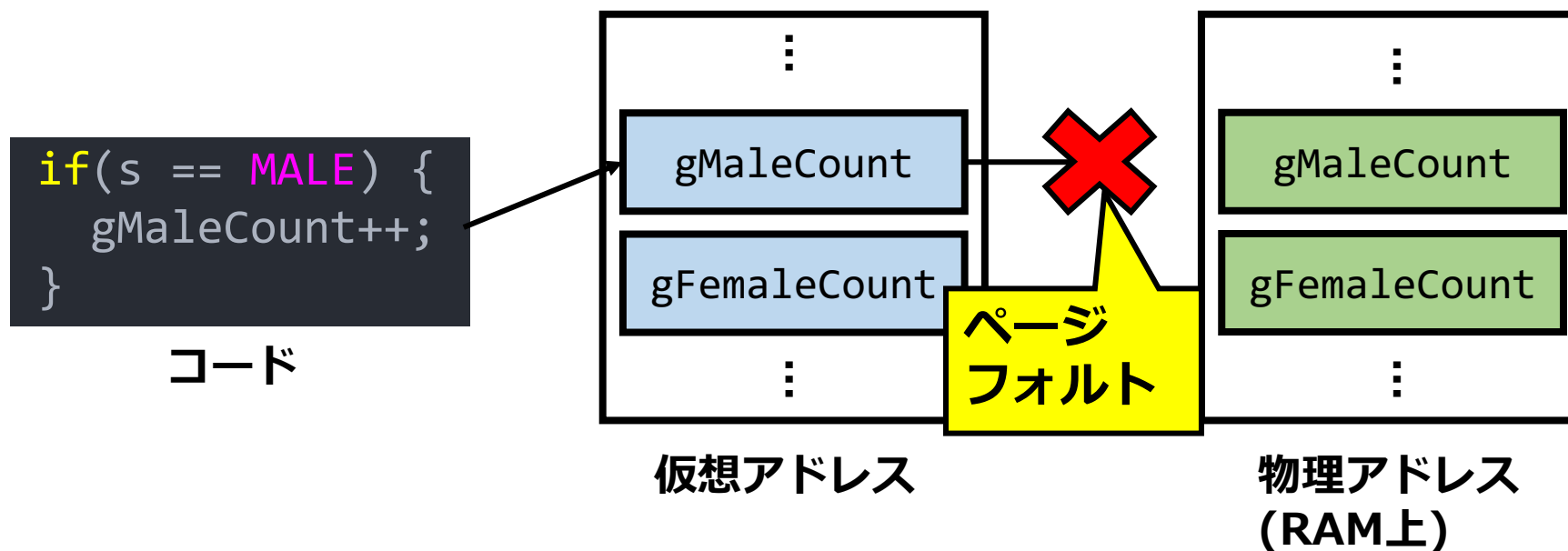


- [illegible]

Phase 2. ページフォルト起動 (2/2)



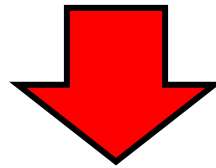
- ページテーブルエントリの**予約ビット**を立てる等により、gMaleCount及びgFemaleCountの載る**ページへのアクセスを禁止**する
- **禁止したページ**に載る**データへのアクセス**が発生すると、**ページフォルト**が発生する



Phase 3. 秘密情報の推定



- ページフォルトが発生すると、OSのページフォルトハンドラにページフォルトアドレスが伝達される
- 攻撃者は、攻撃対象の秘密情報が載っているアドレス(あるいはページ)をオフライン解析にて取得済みである



ページフォルトアドレスをOSから取得する事により、gMaleCountへのアクセスが発生した事、ひいては“s”がMALEだった事も漏洩してしまう

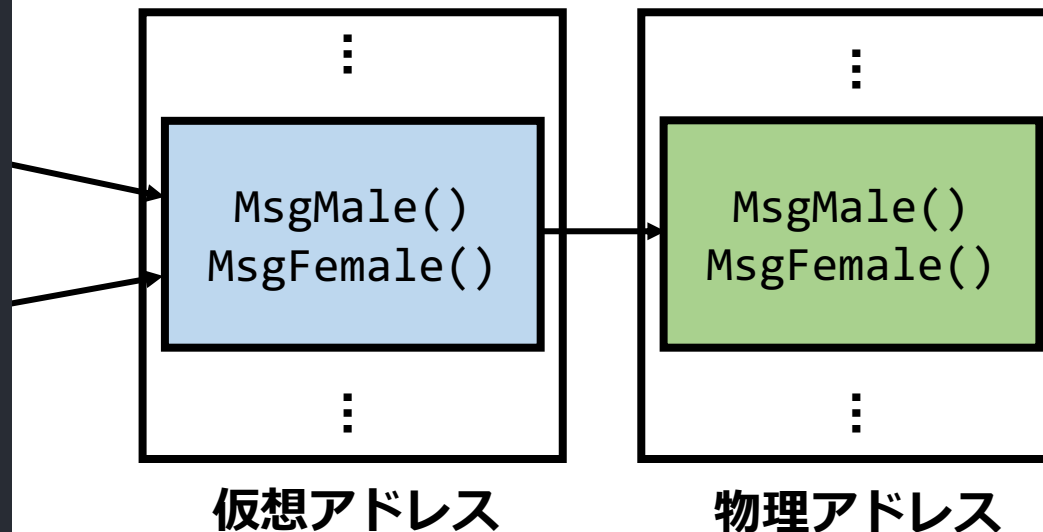
この攻撃を実行する上での困難



- 複数のコードやデータが同一ページ上に載る可能性が多分に存在するため、その場合単にフォールトの発生したページだけを見るだけではどちらのコードやデータなのか**識別できない**

```
char* WelcomeMessage  
(GENDER s) {  
    char *mesg;  
  
    if(s == MALE) {  
        mesg = MsgMale();  
    }  
    else {  
        mesg = MsgFemale();  
    }  
  
    return mesg;  
}
```

コード



SGXから返されるページフォルトアドレス



OSが制御可能

通知されるフォルトアドレスは
MsgMale()の完全なアドレスでは
なく、下位12ビットがゼロ化
されている

OS

ページフォルト
ハンドラ

OSはページフォルトの
発生したページ番号の粒度
でしかアドレスを取得できない

OSは制御不能 (Enclave)

MsgMale()
MsgFemale()

MsgMale()
MsgFemale()

仮想アドレス

物理アドレス

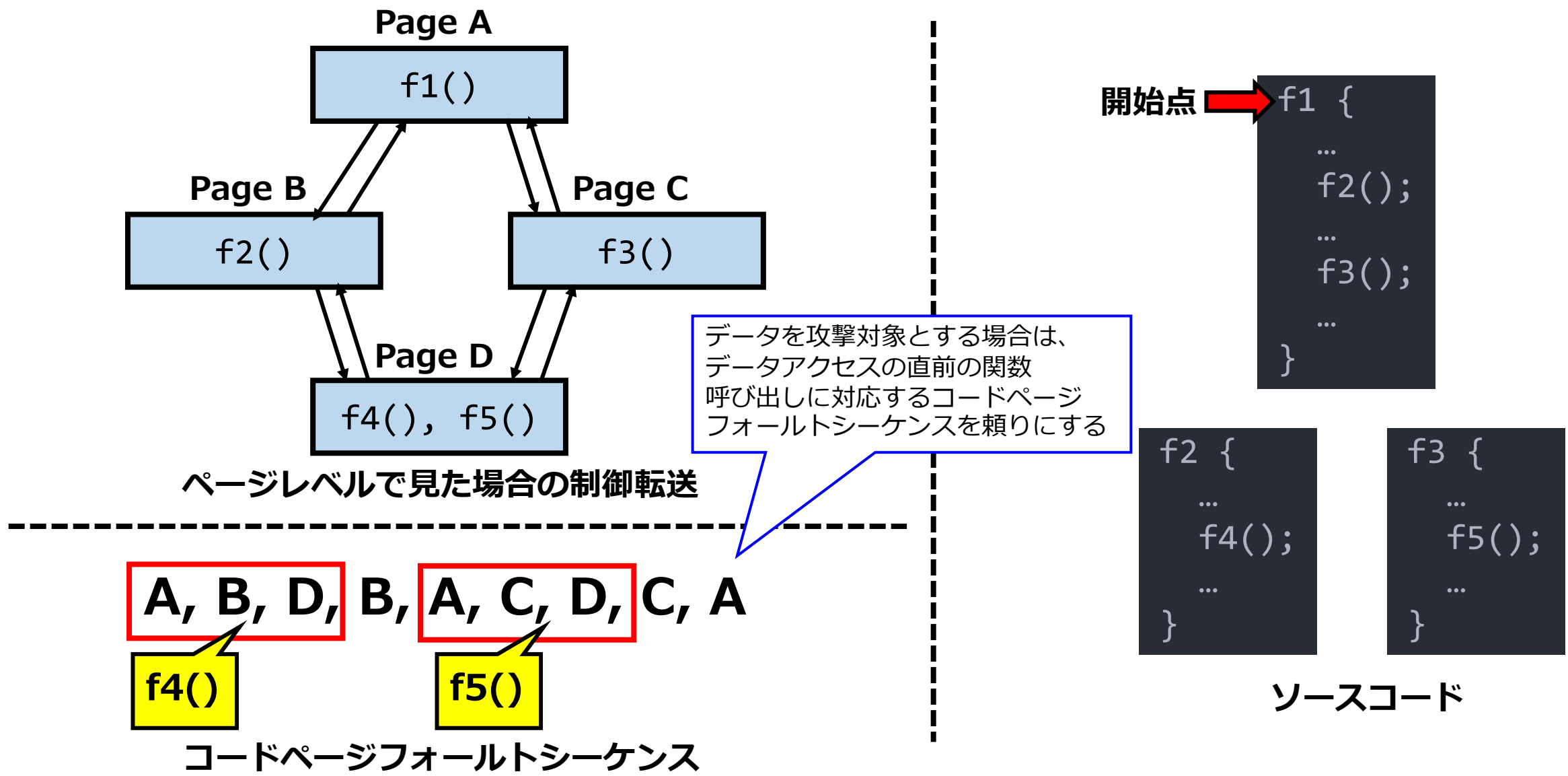


この攻撃を実行する上での困難



- ページレベルの粒度でしかページフォールトアドレスからは情報を得られないため、**複数の秘密情報が同一ページ上に載っていると、このままでは識別が出来ない**
- この問題を解決するには、次のページで説明する**ページフォールトシーケンス**という概念を用いる

ページフォールトシーケンス



攻撃実践例 – Hunspell (スペルチェッカ)



- Hunspellにより参照される辞書ハッシュテーブルに対して攻撃し、秘密情報である文章を抽出

Folklore, legends, myths and fairy tales have followed childhood through the ages, for every healthy youngster has a wholesome and instinctive love for stories fantastic, marvelous and manifestly unreal. The winged fairies of Grimm and Andersen have brought more happiness to childish hearts than all other human creations.

元の文章

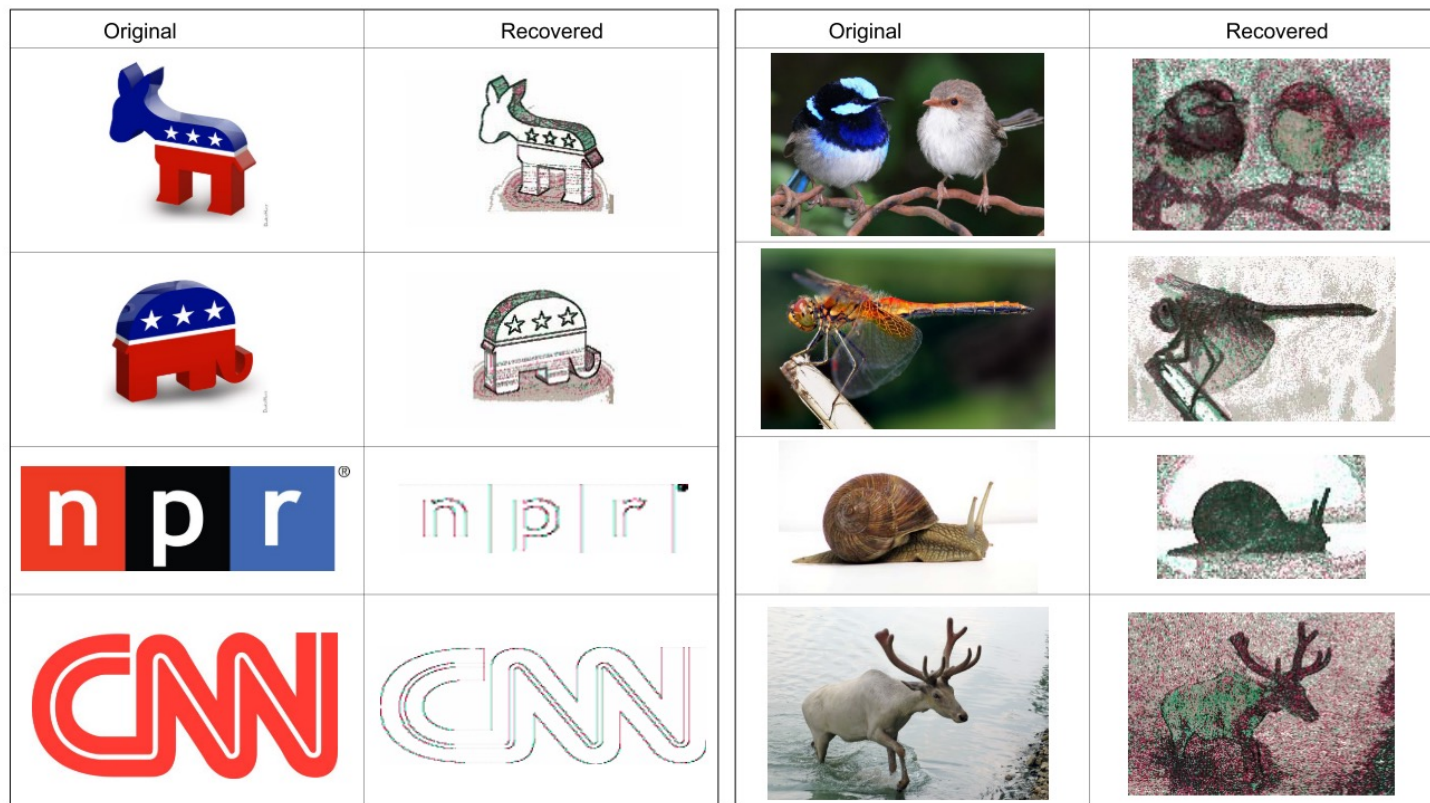
folklore *legend* myths and fairy *tale* have *follow* childhood through the *age* for every healthy youngster has a wholesome and instinctive love for [store] fantastic marvelous and *manifest* unreal the [wine] *fairy* of [grill] and Andersen have brought more happiness to childish *heart* than all other human *create*

抽出した文章

攻撃実践例 – libjpeg



- JPEGファイルのロード時（デコード時）に呼び出される、逆離散コサイン変換を行う関数に対して攻撃し、秘密情報である画像データを抽出





■ Controlled-Channel攻撃実践課題

入力依存データアクセスを行うEnclaveにおいて、分岐先データの載るページのアクセス権を剥奪し、フォールトを発生させて秘密情報の断定を行う実験コードを実装せよ。

但し、OSのページフォールトハンドラを改竄したり中身を見たりするのは難易度が高いため、あくまでも**実験に最適化したEnclave**に対して攻撃を行う。



■ Controlled-Channel攻撃実践の要件

- 攻撃対象Enclaveは、`uint8_t*`型のポインタ**2つ**をグローバル空間に有している
- また、攻撃対象Enclaveは同じく**グローバル空間**に**1バイトの**`uint8_t`型変数である**秘密情報**を有する
- 攻撃対象Enclaveは、**初期化処理**を行うECALLと、**本処理**を行うECALLの**2つのECALL**を提供している



■ Controlled-Channel攻撃実践の要件

- 攻撃対象Enclaveの初期化処理では、**2つのグローバルポインタ**に対しそれぞれ**ページサイズ**分のバッファを割り当て、バッファを（非ゼロの）**適当な値**（'a'など）で**埋め尽くす**
- また、**sgx_read_rand**関数を用いて**uint8_t型**の**乱数**を生成する。
uint8_tの性質上、この値は**0~255**のいずれかになる



■ Controlled-Channel攻撃実践の要件

- **乱数**が**128未満**である場合、**秘密情報**に**0**を代入する。**128以上**である場合は**秘密情報**に**1**を代入する
- 初期化処理ECALL時には、引数として**ページサイズ**を渡しても良い。同時に、Enclave外に**グローバルバッファの仮想アドレス**を**リターン**しても良い



■ Controlled-Channel攻撃実践の要件

- 攻撃対象Enclaveの**本処理**では、**秘密情報**が**0**であれば**一方のバッファ**に、**1**であれば**もう一方のバッファ**に**アクセス**する
(=入力依存データアクセス)



■ Controlled-Channel攻撃実践のヒント

- ページアクセスの禁止は、**mprotect関数**をEnclave外で
用いる事によって比較的容易に実現できる
 - mprotectに渡すアドレスは、**ページの境界のアドレスに一致して**
いなければならない点に注意
- mprotectでアクセスを禁じたページにアクセスすると**セグフォ**が
発生する。この時Enclaveから返ってくるsgx_status_tの値は
SGX_ERROR_ENCLAVE_CRASHEDである
 - つまり、ページフォールトアドレスを見る必要はなく、**クラッシュしたか**
否かで判定できるため、**片方の秘密バッファ**の載るページだけ**アクセスを**
禁じれば十分



- Controlled-Channel攻撃は、攻撃対象コードに**条件分岐さえ存在しなければ無力**である
 - 条件分岐の排除を含め、タイミング攻撃を含むサイドチャネル攻撃の余地を排する実装方法を**定数時間実装**（Constant-time Implementation）と呼ぶ
- SGX-VaultのEnclave内コードにおいて、どれでも良いので**条件分岐を1つ選び、制御フローが単一**になるように**修正**せよ。

Plundervolt攻撃

Plundervolt攻撃 (1/6)



- 最近のCPUには、通常時は**クロック周波数**と**電源電圧**を可能な限り**低い状態**で保ち、必要時にはそれらを**動的にスケールアップ**する、電圧や周波数の**動的スケーリング機能**が備わっている
 - 常にフル稼働だと**過度な発熱**等の問題が発生する
- CPU (CMOS回路) の動的消費電圧は、クロック周波数と電源電圧の2乗との積に比例する ($P_{dyn} \propto f \cdot V^2$)
 - 周波数の増減に応じて電圧も増減するため、周波数や電圧を**独立で変更**すると**不具合が起きる**可能性がある

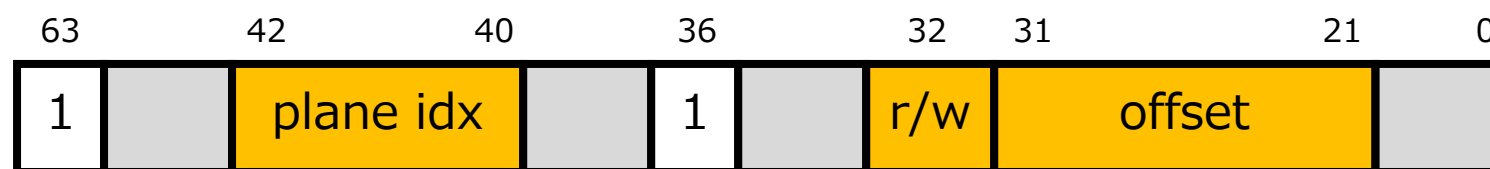


- もし動作電圧を急に下げると、下げた量に応じて**CPU内部の値に故障**（値の改変）が発生したり、酷い場合には**フリーズやクラッシュ**が発生する
 - 乗算をはじめ、**比較的複雑な命令**で特に**故障が発生しやすい**と論文で報告されている[3]
- ところで、最近のIntel製CPUでは、**モデル固有レジスタ**（MSR）のアドレス**0x150**を通して、**CPUの動作電圧に変更を加える事が出来る**
 - MSR：CPU内部の特殊な制御を行うためのCPU固有のレジスタ
 - このMSR自体はIntelによって明文化されていない「**隠し要素**」

Plundervolt攻撃 (3/6)



- MSR 0x150の各ビットの役割は以下の通り：



電圧を操作するハードウェア
(plane) のインデックスを指定。

0: CPUコア
1: GPU
2: キャッシュ (コア内)
3: アンコア
4: アナログ入出力

書き込み可能
ビット

11ビットの符号付き電圧オフセット。
1/1024V単位で、-1Vから+1Vの
範囲で動作電圧に加える変更値を
設定できる

Plundervolt攻撃 (4/6)



- この仕様を悪用し、**MSR 0x150**を通して**瞬間的に動作電圧を下げ**、Enclave内の**秘密情報**（に関連する値）に**故障を発生させる**攻撃が**Plundervolt**攻撃である
 - Plunder（略奪）+Undervolt（低電圧化）から成る造語
 - 一般に**故障注入攻撃**（Fault Injection Attack）と呼ばれる分類に属する攻撃
 - 攻撃者がOS含め攻撃対象のTCB外の全てを掌握している、**標準的なSGXの脅威モデル**に準じている



- CPU内の値に対して**直接故障注入を行う**ため、MEEのメモリ完全性検証により**改竄検知を行う事が出来ない**
 - 同じ物理寄りの攻撃でも、完全性検証に失敗させる事に絞っているSGX-Bombと比較した場合の大きな相違点でもある
- AzureのDCsv2ではマシンが既に**Plundervolt対策**されている上、そもそも**明文化されていないMSRに対する操作**をVMに実行させるのを**拒否している**はずなので、**本攻撃は通用しない**

- 当然、秘密情報に故障を発生させるだけでは秘密情報の抽出はできない
 - また、攻撃を行うにしても、タイミングの問題の対処など様々な工夫の上で成立する攻撃である
- **差分故障解析**という、正しい値と故障した値との差分を悪用し秘密情報を推定する攻撃に繋がったり、**配列インデックス等を故障させて不正な値を参照させる**ようにする事で**真価を発揮する攻撃**

- RSA暗号では、 p, q を相異なる素数、 n を $n := pq$ であるような値、ある整数 e を選んだ上で $de \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$ となる整数 d を用意する
- この上で、RSA暗号では (n, e) を**公開鍵**とし、 d, p, q を**秘密鍵**とする
 - 公開鍵の n からは p, q の値は分からず、あくまでも1つの巨大数の形である
- 平文 m の暗号化の際は $Enc(m) := m^e \bmod n$ とし、暗号文 c の復号は $Dec(c) := c^d \bmod n$ のようにする
 - d を知らずに n, e, c から平文を計算するには、事実上**巨大数 n** についての**素因数分解**を行わなければならない ($(p-1)(q-1)$ の導出のために p, q を導出するため) ので、その**困難さを安全性の根拠**としている

- RSA-CRTは、**中国剰余定理** (**C**hinese **R**emainder **T**heorem) を使用して、復号処理である $Dec(c) := c^d \bmod n$ を高速化する、RSAの復号高速化手法である
- **中国剰余定理**：与えられた2つの素数 p, q が互いに素であれば、任意の整数 a, b に対し

$$x \equiv a \pmod{p}$$

$$x \equiv b \pmod{q}$$

を満たす、 $0 \leq x < pq$ であるような整数 x が一意に存在する。

- これをRSAの文脈に落とし込むために a, b を暗号文関係の値に置き換えると

$$x \equiv c_p^d \pmod{p}$$

$$x \equiv c_q^d \pmod{q}$$

となる (但し $c_p \equiv c \pmod{p}$, $c_q \equiv c \pmod{q}$)

- ここで、フェルマーの小定理について説明する。

■フェルマーの小定理

p を素数とし、 a を p の倍数でない整数 (a と p は互いに素) とすると、

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

が成立する

- フェルマーの小定理を適用すると、 $d_p \equiv d \bmod (p - 1)$,
 $d_q \equiv d \bmod (q - 1)$ とした場合、前述の c_p^d, c_q^d は

$$c_p^d = c_p^{k_{d_p}(p-1)+d_p} \equiv c_p^{d_p} \bmod p$$

$$c_q^d = c_q^{k_{d_q}(q-1)+d_q} \equiv c_q^{d_q} \bmod q$$

となり、解きたい合同式は

$$x \equiv c_p^{d_p} \bmod p$$

$$x \equiv c_q^{d_q} \bmod q$$

となる

- これにより、より小さい秘密鍵 d_p, d_q を用いる事で、復号速度を4倍ほど高速化するのがRSA-CRTである

- 復号の際、実際にはRSA-CRTは以下の二項式を計算している：

$$x = [q \cdot s_p] \cdot c_p^{d_p} + [p \cdot s_q] \cdot c_q^{d_q} \pmod{n}$$

ただし、 x は平文、 s_p, s_q は予め算出した定数

- この二項式の片側に故障を発生させると、**Bellcore-Lenstra攻撃**という**差分故障解析**により**秘密鍵**を抽出できてしまう事が知られている
- よって、**Plundervolt**によって片側の項に故障注入を行う事で、**Enclave内**で使用されている**RSA-CRT**から**RSAの秘密鍵**を抽出する事が出来てしまう

- この二項式の片側の項に故障が発生した、**誤った平文** x' が得られた時、以下の計算で**公開鍵** n を**秘密鍵** p, q に**因数分解できる**という手法が**Bellcore攻撃**である：

$$q = \gcd(x - x', n), p = \frac{n}{q}$$

ただし $\gcd()$ はユークリッド互除法等、最大公約数を算出する関数

- さらに、このBellcore攻撃における q の計算式を

$$q = \gcd(x'^e - c, n)$$

とする事で、 x' と x 双方を計算する必要性を排除するのが
Lenstra法である

- Plundervoltの論文中だとこのLenstra法の式が**間違っている**ので注意。
正しくはPlundervoltのPoCコード[8]を参照
- **Enclave内でRSA秘密鍵が保護**されており、**暗号文を送ると復号して平文を返してくれる**ようなシステムに対して有効な攻撃



- Plundervoltでは、RSA-CRT復号時に適切なタイミングで**-225mV**の**アンダーボルト**を行い、その後元に戻す事で、Bellcore-Lenstra攻撃による**RSA 2048bit秘密鍵の完全な抽出に成功**している
- ちなみに、RSA-CRTはデフォルトではEnclave内APIとしては提供されていないが、Intel IPPで用意されているものを使えるよう設定する事で使用可能になる

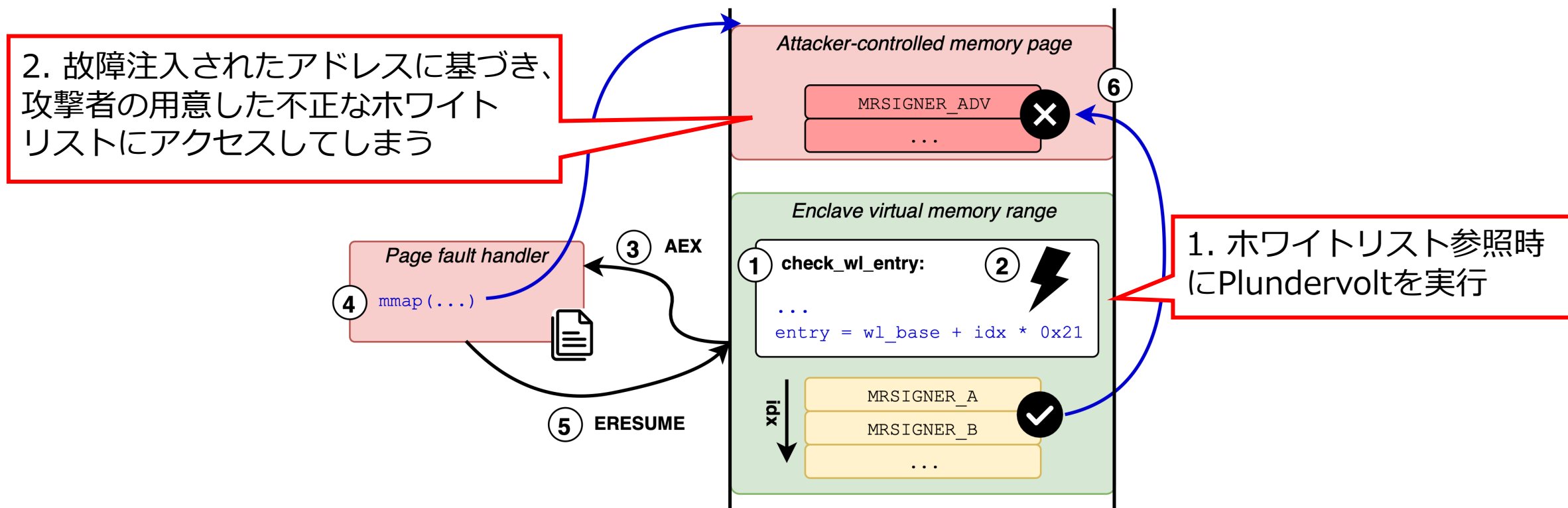
- FLCにおいて使用されるLaunch Enclaveである**ref-LE** (SGX 基礎編セクション参照) では、**起動許可対象**を列挙した **ホワイトリスト**を参照し起動許可判定を行う処理を行う
- この**ホワイトリスト**では、**起動許可対象のMRSIGNER**と、そのEnclaveが**PK**等への**アクセス権を持つかのフラグ**が列挙されている

- ここで、Plundervoltにより**ホワイトリスト配列参照時**に見る**インデックスに故障注入し、攻撃者の用意するUntrusted領域上のバッファにリダイレクト**させる事を考える
- これが実現すると、**攻撃者が用意した不正なホワイトリストを誤って読み取ってしまい、不正な起動許可どころか不正にPKへアクセス**する事も許してしまう

ref-LEに対する攻撃 (3/4)



- ホワイトリストのエントリが**53万件**ある場合に、**-118mV**の**アンダーボルト**をかけ、様々な工夫の末に**参照先リダイレクト**に**成功**している



- ただし、**PKの導出**には**MRSIGNER**が含まれ、このMRSIGNERに対応するのは**IntelのプライベートなEnclave署名鍵**であるため、これにアクセスしなければ**PKの導出は不可能**であり、実質的には**PKへのアクセスは不可能に近い**という事実はある
 - 恐らくこの場合のMRSIGNERは**SECS**を参照するため、仮にAEからMRSIGNERだけを抽出していても、それを使い回す事は出来ないと想定される
 - 万一Intelの鍵が漏洩した場合、その鍵で署名を行う事でPKにアクセスする事が出来てしまう

本セクションのまとめ



- Controlled-Channel攻撃について解説を行い、実際にEnclaveのページアクセス権の拒絶に伴う挙動からサイドチャネル的に秘密情報を推測するPoCコードの実装を行った
- 電圧操作による故障注入攻撃であるPlundervoltについて解説し、ケーススタディとしてRSA-CRTに対する攻撃とref-LEに対する攻撃について説明を行った

参考文献 (1/2)



- [1] "Controlled-Channel Attacks: Deterministic Side Channels for Untrusted Operating Systems", Yuanzhong Xu et al., <https://ieeexplore.ieee.org/document/7163052>
- [2] "Intel SGX - Controlled-Channel Attacks解説", 自己引用, <https://qiita.com/Clifford/items/f527fd210e3f7866e803>
- [3] "Plundervolt: Software-based Fault Injection Attacks against Intel SGX", Kit Murdock et al., <https://plundervolt.com/doc/plundervolt.pdf>
- [4] "CPU/MSR - SyncHack", 2023/7/18閲覧, <http://mcn.oops.jp/wiki/index.php?CPU%2FMSR>
- [5] "クラウドを支えるこれからの暗号技術", 光成滋生, <https://herumi.github.io/ango/>
- [6] "CRT-RSAとfault attack", 2023/7/19閲覧, <https://hackmd.io/@Xornet/ryoP8VxUw>
- [7] "中国の剰余定理 - wikipedia", 2023/7/19閲覧, <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E3%81%AE%E5%89%B0%E4%BD%99%E5%AE%9A%E7%90%86>



[8]"plundervolt/sgx_crt_rsa/Evaluation/eval.py", GitHub,
https://github.com/KitMurdock/plundervolt/blob/master/sgx_crt_rsa/Evaluation/eval.py