

JavaScript による End-to-End セキュリティ

第2回 AES はどうやって使えばいいのか？ 編

栗原 淳

はじめに

はじめに

前回(第1回)は

- End-to-End (E2E) セキュリティの原則と必要性
- Web サイトでの E2E セキュリティ実践のため、JavaScript での暗号 (AES) の利用のさわり

を勉強した。

E2E セキュリティの重要性はわかった。

AES を使ってみることもできた。

でも、実際の App で正しく・安全に AES を使うにはどうすべきなのか？

今回は正しく・安全にAESを使ってみる方法、についてのお話。

この講義で最終的に学びたいこと

- パスワードを使って AES 暗号化はどうすればいいか？¹
- 固定のマスターシークレット(バイナリ値)²を使って AES 暗号化はどうすればいいか？³

たったこれだけ。

¹RFC8018 PBES2 <https://tools.ietf.org/html/rfc8018> による AES 暗号化

²よくサーバの.env ファイルとかに Base64 で書くアレ。

³RFC5869 HKDF <https://tools.ietf.org/html/rfc5869> による鍵導出と AES 暗号化

たったこれだけでも、気をつけなければならない「重要なお作法」がある。

お作法を守る・守らないで安全性は大違いなので、注意しなければならない。⁴

⁴世の中のソフトウェア、全くお作法を守ってないのが散見されてとても危険。最近だと php の `hash_hkdf()` がお作法守ってなかった(2018年)。

この講義の対象と事前準備

対象:

- 暗号・セキュリティ技術に興味がある初学者
- Web に暗号技術を導入したい Web 系のエンジニア

必須ではないが触って楽しむのには必要な事前準備:

- Bash, Git が使えるようになっていること
- Node.js, npm, yarn が使えるようになっていること
- Google Chrome 系ブラウザ and/or Firefox が利用可能のこと

今後の予定 (暫定)

- 1 導入&JS の暗号化コードを触ってみる
 - 2 AES を正しく・安全に暗号化するには? ← 今日はココ
 - 3 公開鍵暗号はどうやって使う？その使い方のコツは？
 - 4 ハッシュ・MAC・署名、それぞれの使い所と使い方は？
- 「こういうのを知りたい」というリクエストがあれば是非。

栗原 淳 (Jun Kurihara)

- (株)ゼタント 主任研究員
(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)連携研究員
(来年年明けから)某公立大の准教授
- 博士(工学),
専門: セキュリティ、応用数学、システムアーキテクチャとか
- Webシステム(フロントエンド・バックエンド)を作ったり、論文他のアルゴリズムを実装したり、研究して論文書いたり、セキュリティ技術中心に手広くやってます。
- GitHub: <https://github.com/junkurihara>
LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/junkurihara>

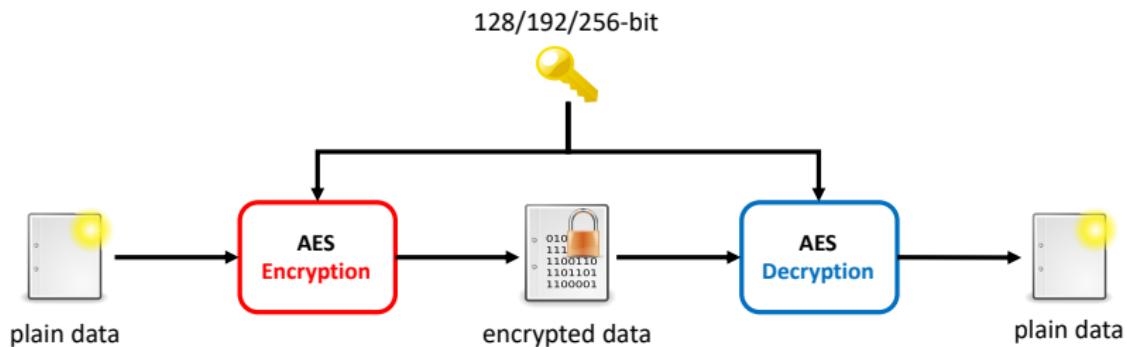
AES の使い方 事始め

AES (Advanced Encryption Standard) とは？

AES

米国 NIST の標準暗号アルゴリズム

- 鍵長は 3 種類: 128-bit, 192-bit, 256-bit
- 欧州 NESSIE、日本 CRYPTREC などの標準規格としても採択
- 現在まで致命的な欠陥は見つかっていない、安全性の高いアルゴリズム



AES を使うために

AES を使う際に気をつけるお作法は、ざっと 3 点。

- ① AES で使う鍵のランダム具合
- ② AES で使う鍵を総当たりする際の大変さ⁵
- ③ AES の利用モードの安全性

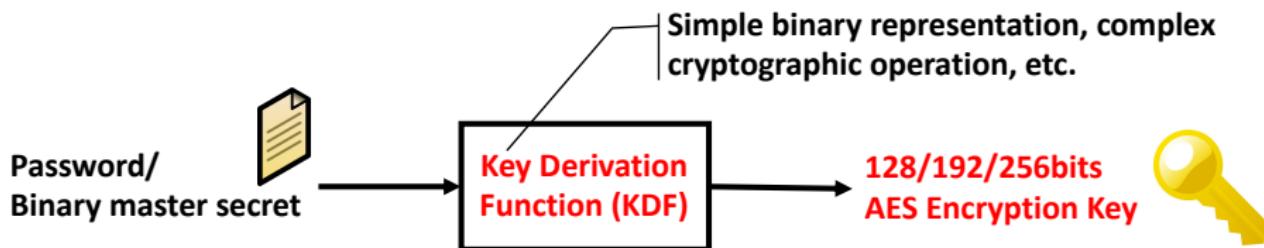
つまりどういうこと？

⁵1 点目と 2 点目は似ているようで異なる。

準備: パスワードとかを使った AES 暗号化のポイント

パスワード ≠ AES 暗号化の鍵

パスワードやマスターシークレットを元にして AES 暗号化するためには、「パスワード等を変換し、AES 暗号化の鍵を導出」することが必要



1: AES で使う鍵のランダム具合？

⇒ 過去の利用履歴も含めたランダムさのこと

つまり…

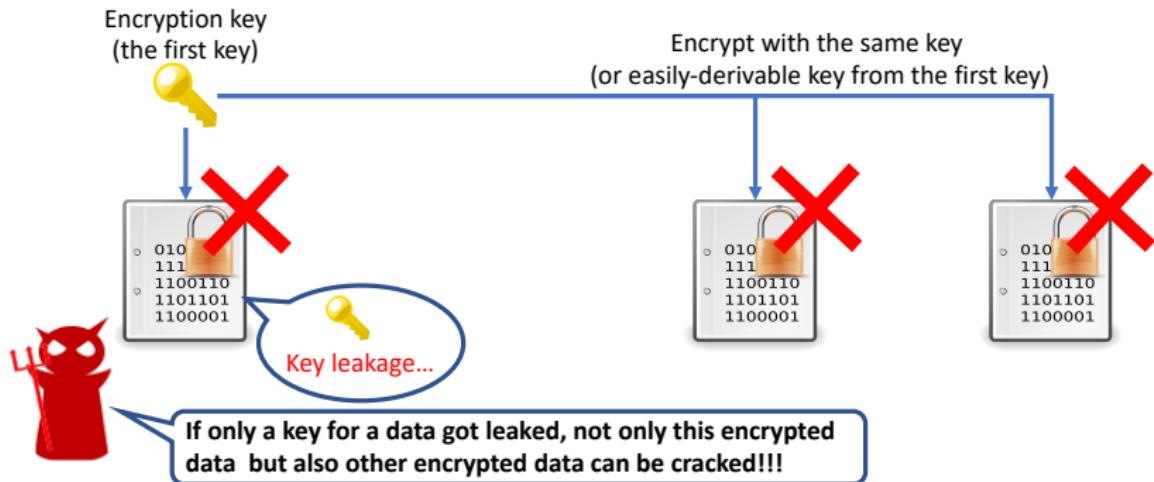
- 過去に暗号化を使った鍵は二度と使わない
- 暗号化の鍵は、過去の鍵から⁶は容易に導出できないものへと毎回ランダム変更する

ということ。

⁶ および未来に使う鍵からも

…なぜか？

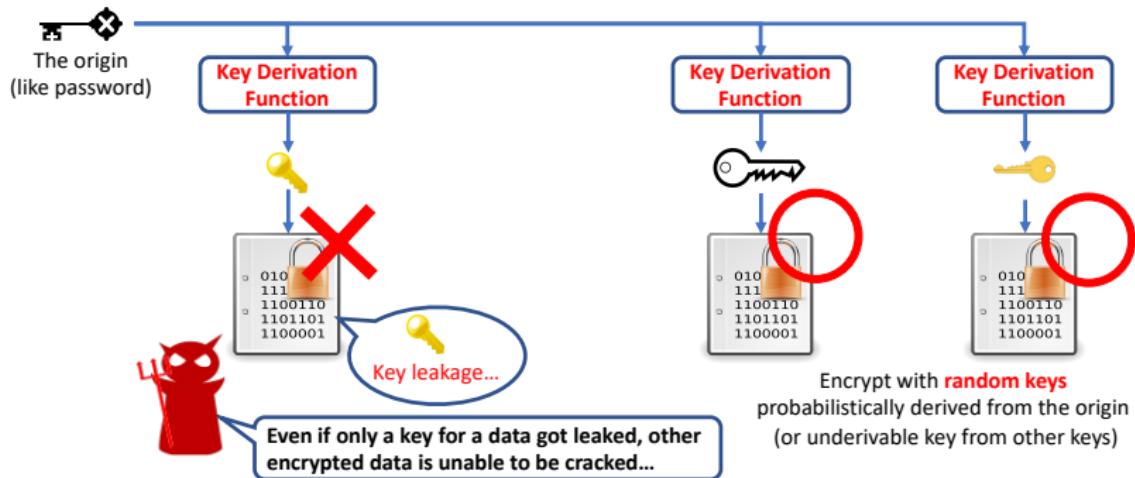
⇒ 鍵が1つ漏れてしまうと、過去の暗号化データまで一網打尽…。



なので、万一鍵が1つ漏れちゃったとしても、他の暗号化データにまで影響が出ないことを保証しなきゃならない。

だが、暗号化毎のパスワード等のランダム変更は非現実的。

⇒ 固定パスワード等から不可逆かつランダムに鍵を導出する方法を使う⁷。



※ただし、固定パスワード等そのものが漏洩した場合はこの場合でもアウトなことに注意

⁷PBKDF2 (RFC8018), HKDF (RFC5869)

2: AESで使う鍵を総当たりする際の大変さ？

⇒ 総当たり攻撃のためのコストのこと。

※特にパスワードを使って暗号化する場合に重要

暗号化データに対する総当たり攻撃

鍵の候補を全通りを一覧で用意して、「当たり」を見つけるまでとにかく復号を繰り返すこと。

つまり総当たり攻撃のコストは、「ストレージ量」と「計算量」。
このコストを払うことが非現実的に高くなければヤバい。

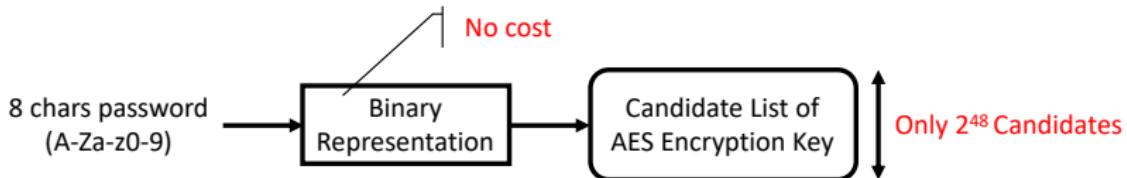
8桁パスワードを単純にバイナリ化して鍵としてしまうと…

大小英数字8桁パスワードは $62^8 < 2^{48}$ 通り。

⇒ 48bits の全通りの準備は、高々 1.5PB。

⇒ ストレージなしでも、パスワード候補を都度バイナリ化するだけで復号を試行可能。

割と簡単に「当たり = 48bits」が見つかってしまう。⁸



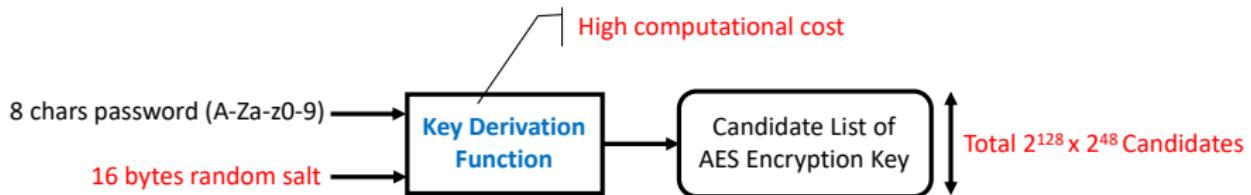
⁸2009年当時でもスパコンを使って60時間とか。今だとGPUで並列化すればもっと高速になる。<https://web.archive.org/web/20180412051235/http://www.lockdown.co.uk/?pg=combi&s=articles>

なので、短いパスワード等から鍵を作るときは、コストが膨大になるような変換をする。

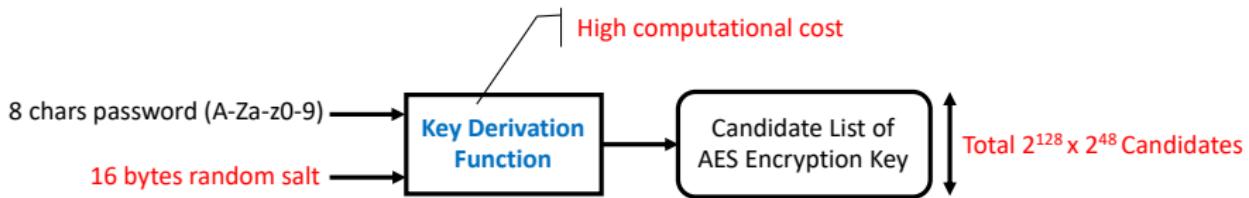
パスワード等から暗号化の鍵を作るとき、

- 毎回使い捨てのランダム値 (Salt と呼ぶ) と混合して、AES 暗号化の鍵のランダム性を上げる。
- 計算コストの高い不可逆の演算を使う。

という処理を行う。⁹



⁹PBKDF2



- ランダムな Salt と混合することで、**鍵候補全通りの事前準備のストレージが膨大になる**
- ストレージなしで試行しても、計算コストの高い演算のせいで、**鍵候補を都度生成→復号の計算コストが莫大になる**

「お作法 1」と合わせて 1 つの関数で実行することが多いが、AES 暗号化の鍵を作る際に意識する重要なポイント。

3: AES の利用モードの安全性？

⇒ AES の API で設定できる利用モード ('AES256-CBC' とか) と、
そのパラメタの適切な設定をしないと致命的な事態に陥る。

AES の「利用モード」

AES の処理 1 回で暗号化できるのはたった 16bytes にすぎない。
長いデータを連續で暗号化するために、**暗号化処理を連續して組み合わせる方法**が利用モード。

「とりあえず AES を使う」ための利用モード設定のポイントは 2 つ

- 初期ベクトル (IV) というパラメタは都度ランダム値にする¹⁰。
- CTR モード・CBC モードあたりを使う。ECB モードは絶対に使わない。

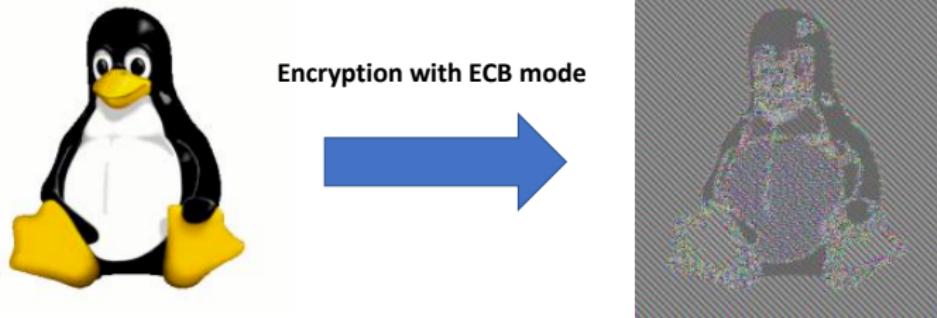
前者、「過去に暗号化したデータとの相関をなくす」ために必要なパラメタ設定。

後者、ECB モードは論外 (これが言いたいこと)。

¹⁰ API によって、ナンス (Nonce) というパラメタもあればそれも。

どうして ECB モードは論外なのか？

- ⇒ 元のデータの中で「同じ値のブロック¹¹」は、暗号化データにおいても必ず「同じ値のブロック」になる。
- ⇒ 暗号化されてても中のデータが何かというのが予測可能…



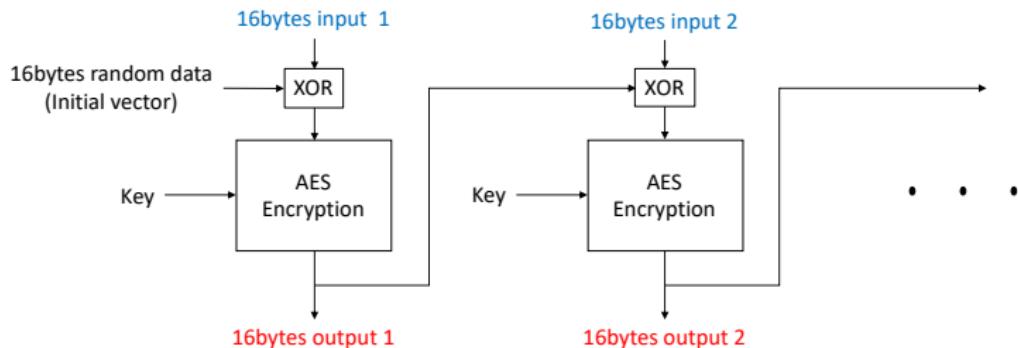
Original images are given by Larry Ewing
(lewing@isc.tamu.edu)

というわけで、JavaScript 以外でも、たとえ選べたとしても絶対に ECB モードは利用してはいけない。

¹¹ ブロックは 16Bytes 単位

ECB モードと違って、CBC モードではそういうことが起きない。

- 先頭の 16Bytes はランダムな初期化ベクトルと混ぜる
- 前の 16Bytes の暗号化データを混ぜて次の 16Bytes を処理

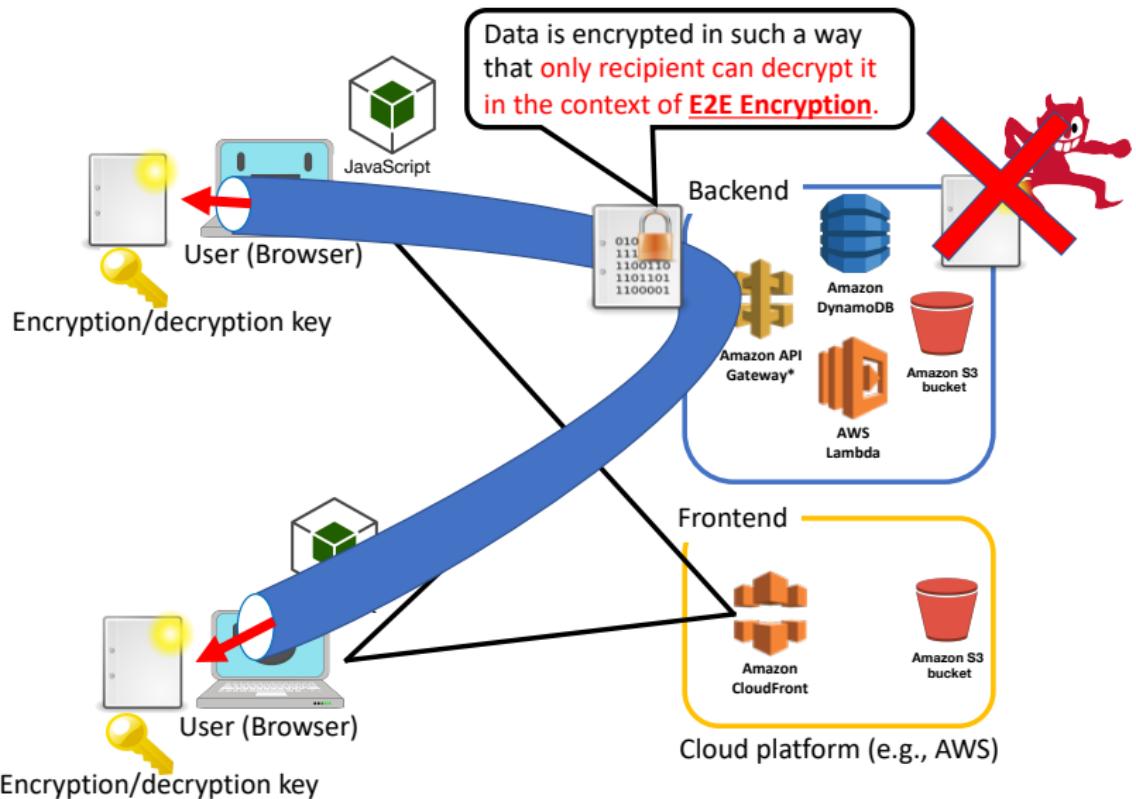


CBC モードの 16Bytes 毎の処理

AESの使い方: とりあえず暗号化してみよう

今回のセッティング

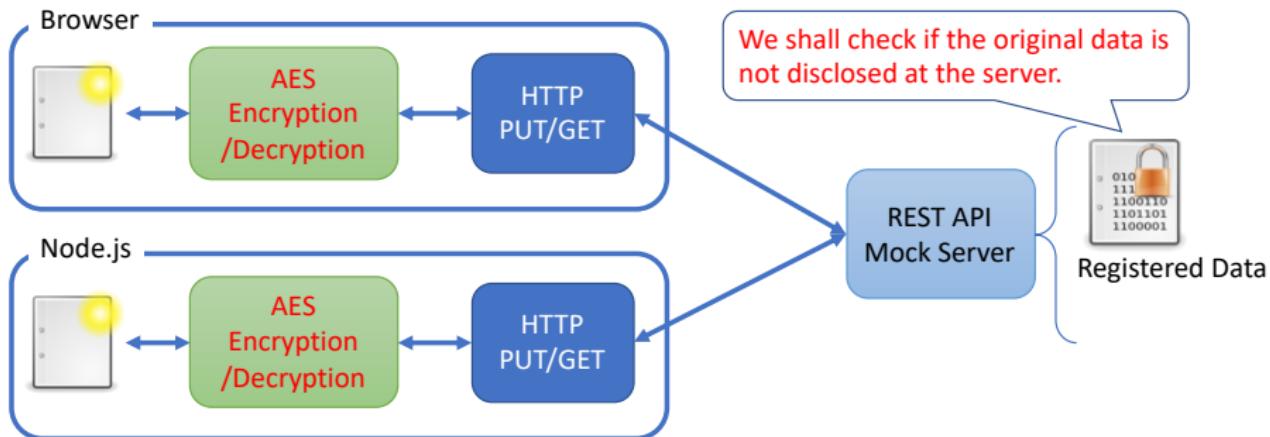
前回同様の REST API サーバを介した E2E 暗号化。



ブラウザ・Node.js をエンドとし、

- 1 「パスワード」「マスターシークレット」から鍵を導出し¹²
- 2 それを使って AES-CBC モードで暗号化して¹³

REST API で暗号化データを登録してみる。



¹²お作法 1,2

¹³お作法 3

環境

以下の環境が前提:

- Node.js (> v10) がインストール済。yarn が使えること。¹⁴
- ブラウザとして、Google Chrome (系ブラウザ)、もしくは Firefox がインストール済み
- Visual Studio Code や WebStorm などの統合開発環境がセットアップ済みだとなお良い。

¹⁴ インストールコマンド: `npm i -g yarn`

JavaScript プロジェクトの準備

- プロジェクトの GitHub リポジトリ¹⁵ を Clone

```
$ git clone https://github.com/zettant/e2e-security-02  
$ cd e2e-security-02/sample
```

- 依存パッケージのインストール

```
$ yarn install
```

- ライブラリのビルド

```
$ yarn build
```

¹⁵<https://github.com/zettant/e2e-security-02>

REST API モックサーバの準備

今回は SSL 接続可能な共有サーバを準備済
(<https://e2e.zettant.com/>)。

別途、検証用のサーバをローカルで立ち上げ可能。

モックサーバの立ち上げ

```
$ yarn start
```

起動すると、localhost の 3000 番ポートで HTTP リクエストを待ち受け開始する。

まずはコマンドラインを叩き、Node.js で

- パスワードで AES 暗号化
- マスターシークレットで AES 暗号化
- ヤバい利用モードでのヤバさを実感

してみる。

※ユニバーサル暗号ユーティリティ「jscu」¹⁶ を使ってサンプルを制作しているので、**ブラウザでも全く同じ API・Code snippet を試用可能。**

¹⁶<https://github.com/junkurihara/jscu>

パスワードで暗号化してみる

「yarn execute post -r -p ‘パスワード’ ‘データ’」で暗号化。

sample ディレクトリ以下で実行

```
$ yarn execute post -r -p 'my password' 'my private data' // -r を抜くとローカル  
Register encrypted data to remote server  
Data: my private data  
Password: my password  
Derived key and its related params: // パスワードから生成された鍵とパラメタ  
  Derived key in Base64: fiP4flrlhd3Iwg5M0yln7zNNk4Au9If429n2uvfi43s=  
  PBKDF2 Param - Salt in Base64: zyD7/TGDq3dig3l4zJ5SRzFKVnIjw2KG26XUrMZFkkw=  
  PBKDF2 Param - Hash: SHA-256  
  PBKDF2 Param - Iteration: 2048  
Registered id: 1 // id=1 で暗号化データと鍵導出のパラメタを登録
```

長い鍵「S4lFVWrVlj4OjPfFRTgVJFfRUI+6Llw1VooFzG2J5E=」を短い
「my password」から生成。

また、同じパスワード・データでも毎回異なる鍵になることを確認する。

登録データは <https://e2e.zettant.com/data> で一覧。

```
[{"data": "1Up45UU09pkeD81a5E5o4w==", "iv": "RkfsY25R1B0MWN5/qnGOjw==", "kdfParams": {"salt": "zyD7/TGDq3dig3l4zJ5SRzFKVnIjw2KG26XUrMZFkkw=", "hash": "SHA-256", "iterationCount": 2048}, "id": 1}]
```

AES暗号化されたデータ
AES暗号化に使われるIV
パスワードから鍵を導出するためのパラメタ

暗号化データ以外、復号側と共有する公開パラメタ：

- AES の CBC モード → IV
- パスワードから鍵の導出 → Salt, iteration 回数、Hash 関数

「yarn execute get -r -p ‘パスワード’ ‘id 番号’」で復号。

```
$ yarn execute get -r -p 'my password' 1 // -r を抜くとローカル
Retrieve encrypted data to remote server
Id: 1
Password: my password
Derived key and its related params: // 取得した公開パラメタと、生成した鍵
  Derived key in Base64: fiP4flrlhd3Iwg5M0yln7zNNk4Au9If429n2uvfi43s=
  PBKDF2 Param - Salt in Base64: zyD7/TGDq3dig3l4zJ5SRzFKVnIjw2KG26XUrMZFkkw=
  PBKDF2 Param - Hash: SHA-256
  PBKDF2 Param - Iteration: 2048
Decrypted data: my private data // 正しく復号された
```

暗号化の時と同一の鍵が生成されたことに注目。

中のコードがどうなっているかは後述。

マスターシークレット(バイナリ)で暗号化してみる

「yarn execute post -r -m ‘マスターシークレット’ ‘データ’」で暗号化。¹⁷

sample ディレクトリ以下で実行

```
$ yarn execute gen-secret 32 // まずは Base64 でマスターシークレットを生成する。
Generated master secret in Base64: mP95WFEv3G/iWsjQKC4mEuEmCkiS8dRK80Q6CpC1bc0=
```

```
$ yarn execute post -r -m 'mP95WFEv3G/iWsjQKC4mEuEmCkiS8dRK80Q6CpC1bc0=' 'my
private data'
```

Register encrypted data to remote server

Data: my private data

```
Master secret: mP95WFEv3G/iWsjQKC4mEuEmCkiS8dRK80Q6CpC1bc0=
```

Derived key and its related params: // マスターシークレットから生成された鍵とパラメタ

Derived key in Base64: 1vgTfxp3FEi3kpJiQ6h0vxtDCkdz+u5XQUF1tPm1VMy=

HKDF Param - Salt in Base64: 8SM9tyXJUX+JGwLswIUnnGyHPL+7hzkSHXaKY7z0AF0=

HKDF Param - Hash: SHA-256

Registered id: 2

同じマスターシークレット・データでも毎回異なる鍵になることを確認する。

¹⁷ マスターシークレットは Base64

ブラウザで確認してみる。

```
},  
{  
  "data": "GFEtip320wwAt3OpRSOpvq==",  
  "iv": "9htsBwr3D1HmP0Eq6As0WA==",  
  "kdfParams": {  
    "salt": "8SM9tyXJUX+JGwLswIUnnGyHPL+7hzkSHXaKY7z0AF0=",  
    "hash": "SHA-256"  
  },  
  "id": 2  
}  
1
```

AES暗号化されたデータ
AES暗号化に使われるIV
パスワードから鍵を導出するためのパラメタ

暗号化データ以外、復号側と共有する公開パラメタ：

- AES の CBC モード → IV
- マスターシークレットから鍵の導出 → Salt, Hash 関数

「yarn execute get -r -m ‘マスターシークレット’ ‘id 番号’」で復号。

```
$ yarn execute get -r -m 'mP95WFEv3G/iWsJQKC4mEuEmCkiS8dRK80Q6CpC1bc0=' 2 // -r を抜くとローカル
Retrieve encrypted data to remote server
Id: 2
Master secret: mP95WFEv3G/iWsJQKC4mEuEmCkiS8dRK80Q6CpC1bc0=
Derived key and its related params: // 取得した公開パラメタと、生成した鍵
  Derived key in Base64: 1vgTfxp3FEi3kpJiQ6h0vxtDCkdz+u5XQUF1tPm1VMy=
  HKDF Param - Salt in Base64: 8SM9tyXJUX+JGwLswIUnnGyHPL+7hzkSHXaKY7z0AF0=
  HKDF Param - Hash: SHA-256
Decrypted data: my private data // 正しく復号された
```

暗号化の時と同一の鍵が生成されたことに注目。

中のコードがどうなっているかは後述。

ブラウザでもパスワード暗号化・マスターシークレットでの暗号化が試せる。

sample02/src/post-get-browser.html を開いて開発者コンソールから試してみよう。

(サンプルコードは html ファイルに記載)

危ない暗号化モードで暗号化してみる

ECB モードで暗号化できる API を用意してみたので、それで暗号化してみるとヤバさが目に見えてわかる。

```
$ yarn execute aes-mode-compare '0123456789ABCDEF0123456789ABCDEF' ← 16bytes 每  
random key (Base64): 4gfrl+/OMyFt2ALLEp24sIXyHsyjv1YZZxRj4lkJe9M=  
data (Hex): 3031323334353637383941424344454630313233343536373839414243444546  
AES-ECB (Hex): c871e345b92951236059676b0866c7af c871e345b92951236059676b0866c7af  
...  
AES-CBC (Hex): d34ad4cc8816edcf3ad1a56c355c9067 69c4f525903b607960e377649abef648  
...
```

16bytes 単位で同じ値が出てくるデータを、ECB モードで暗号化してみると ECB モードだと暗号文も同じ値の繰り返しになる。
⇒ 元のデータが推測しやすくなる。

CBC モードだと暗号化データが繰り返されるようなことはない。

18

ECB モードについては、WebCryptoAPI などではその危険性のためにサポートされていない¹⁹ が、**どんな場合であっても ECB モードの利用は避けて**、CBC モードや CTR モードなどを利用しよう。

¹⁸ というか、繰り返しが発生してしまうようなものは ECB だけ。

¹⁹ サンプルコードでは、CBC モードを弄って ECB モードを再現している。

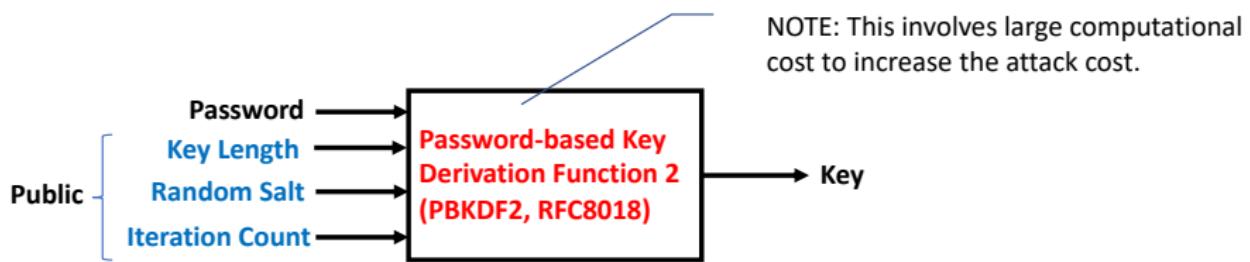
AESの使い方: 細かめの解説

PBKDF2 の使い方 in JavaScript

パスワードから AES の鍵を導出するのに使った。

PBKDF2: Password-based Key Derivation Function

PKCS #5 v2.1 (RFC8081²⁰) にて規定。非推奨の PBKDF1 の置き換え。PBKDF2 を利用した (AES) 暗号化は、Password-based Encryption Scheme 2 (PBES2) と規定される。



他にも、BCrypt など類似のアルゴリズムがある。²¹

²⁰ <https://tools.ietf.org/html/rfc8018>

²¹ 「パスワードハッシュ化」と「パスワードから鍵導出」で目的は異なれど、必要な機能は一緒。

PBKDF2 は、WebCrypto API, Node.js Crypto 共にネイティブ実装。今回は、手前味噌だが API 差をなくすのに jscu を利用。

sample/src/derive-key.js: deriveKeyFromPassword

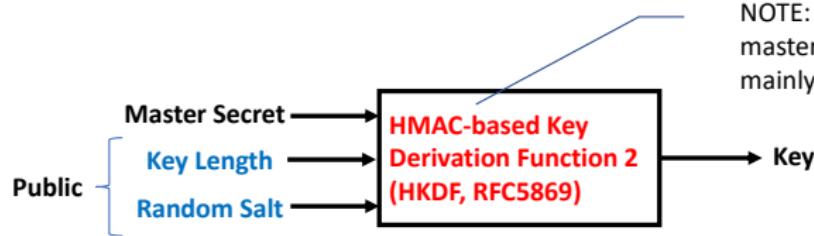
```
const jscu = getJscu(); // 環境に応じて jscu を script タグで読み込んだり、require したり。  
  
if(!salt){ // salt が入力されなかったらランダム値を生成。Salt は任意長。  
    salt = jscu.random.getRandomBytes(32); // Uint8Array  
}  
else {  
    salt = jseu.encoder.decodeBase64(salt); // Base64 から Uint8Array にデコード  
}  
  
const key = await jscu.pbkdf.pbkdf2( // PBKDF2 により鍵導出  
    password, // パスワード。  
    salt, // 復号側と共有 (公開)。  
    iterationCount, // 内部処理の反復回数。通常 1000 回以上。復号側と共有 (公開)。  
    len, // 出力する鍵の長さ。復号側と共有 (公開)。  
    hash // 内部の HMAC 関数用の Hash 関数名。'SHA-256'。復号側と共有 (公開)。  
);
```

HKDF の使い方 in JavaScript

マスターシークレットから AES の鍵を導出するのに使った。

HKDF: HMAC-based Key Derivation Function

RFC8081²² にて規定。PBKDF2 と違って、鍵の導出計算量を莫大にする効果は薄いので、長めのマスターシークレットを元にする場合に使う。



NOTE: This assumes a relatively long-enough master secret like > 80 bits. This is employed mainly to remove the bias of distribution.

²²<https://tools.ietf.org/html/rfc5869>

HKDF は、WebCrypto API でのみネイティブ実装。
今回は、手前味噌だが環境差をなくすのに jscu を利用。

sample/src/derive-key.js: deriveKeyFromMasterSecret

```
const jscu = getJscu(); // 環境に応じて jscu を script タグで読み込んだり、require したり。

if(!salt){ // salt が入力されなかったらランダム値を生成。Salt は任意長。
    salt = jscu.random.getRandomBytes(32); // Uint8Array
}
else {
    salt = jseu.encoder.decodeBase64(salt); // Base64 から Uint8Array にデコード。
}

const keyObj = await jscu.hkdf.compute(
    masterSecret, // マスターシークレット。
    hash          // 内部の HMAC 関数用の Hash 関数名。'SHA-256'。復号側と共有（公開）。
    len,          // 出力する鍵の長さ。復号側と共有（公開）。
    '',
    salt          // 復号側と共有（公開）。
);
```

暗号化モードの設定

jscu では、CBC モードと CTR モードに加えて、CTR モードを拡張した GCM²³ をサポートしている。

sample/src/encrypt.js: encrypt

```
const jscu = getJscu(); // 環境に応じて jscu を script タグで読み込んだり、require する。

const uint8iv = jscu.random.getRandomBytes(16); // ランダム IV の生成。CBC は 16Bytes.

const encrypted = await jscu.aes.encrypt( // AES 暗号化
    jseu.encoder.stringToArrayBuffer(data), // string data の Uint8Array 化
    key, // HKDF/PBKDF で導出した鍵
    { // CBC 暗号化モードを設定
        name: 'AES-CBC',
        iv: uint8iv
    }
);
```

²³ GCM(Galois/Counter Mode) は、CTR モードで暗号化したデータに認証タグを付与したもの。暗号化したデータの改ざんを検知できる。

sample/src/encrypt.js: decrypt

```
const jscu = getJscu(); // 環境に応じて jscu を script タグで読み込んだり、require する。
```

```
const decrypted = await jscu.aes.decrypt( // AES 復号
    jseu.encoder.decodeBase64(data), // Base64 の暗号化データをデコード。
    key, // HKDF/PBKDF で導出した鍵
    { // CBC 暗号化モードを設定
        name: 'AES-CBC',
        iv: jseu.encoder.decodeBase64(iv) // Base64 で与えられた IV をデコード。
    }
);
```

まとめ

まとめ

お疲れ様でした。

- AES 暗号化する際のお作法を学んだ。
 - 鍵のランダムさを上げる、鍵への攻撃を困難にするために Key Derivation Function を適切に使う。
(※今回紹介した PBKDF2/HKDF 以外の方法もある。²⁴⁾)
 - 利用モードは CBC モードや CTR モードを使う。
- お作法を守った JavaScript での実装例を触ってみた。

²⁴e.g., JOSE 向けの Concat KDF with AESKW <https://tools.ietf.org/html/rfc8037>

次回は

内容:

- 公開鍵暗号を使うコツ（数学的なことはやらない）
- RSA-OAEP
- EDCH-Ephemeral + AES

宣伝: iTransfy by Zettant

簡単・安全にファイル転送ができる

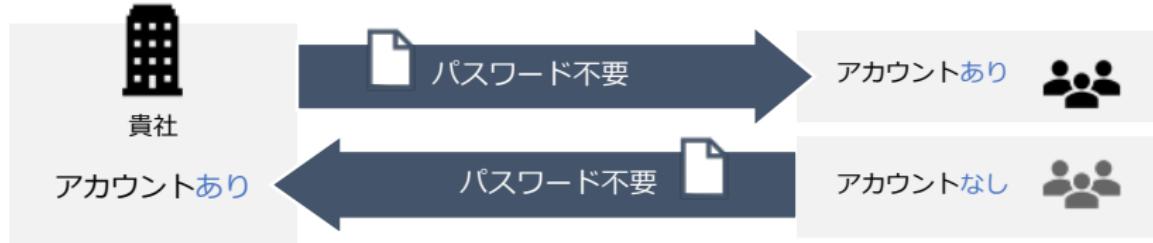


iTransfy for biz

<https://www.itransfy.com>

アカウント登録で、パスワード入力の手間が省けます

クライアント/協力会社等へファイルを送りたい、また送付してほしい時の手間を軽減



宣伝: 株式会社ゼタント



ゼタントはのミッションは、
「自分の身は自分で守ることができる世の中にする」
ことです。
共感してくれる仲間を募集しています！

問合せ先: recruit@zettant.com
会社 URL: <https://www.zettant.com>